



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**VIIVI KALLIO**  
**OPTIMAALISEN URITUKSEN LÖYTÄMINEN**  
**SUURNOPEUSKONEEN MASSIIVIROOTTORILLE**  
Diplomityö

Tarkastaja: professori Seppo Valkealahti

Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekuntaneuvoston  
kokouksessa 4. joulukuuta 2013

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

**KALLIO, VIIVI:** Optimaalisen urituksen löytäminen suurnopeuskoneen massiiviroottorille

Diplomityö, 69 sivua, 3 liitesivua

2014

Pääaine: Sähköverkot ja -markkinat

Tarkastaja: professori Seppo Valkealahti

Avainsanat: uritettu massiiviroottori, massiiviroottori, aksiaaliset urat, radiaaliset urat, vinot urat, suurnopeusinduktiokone.

Pakokaasujen kierrätysjärjestelmä EGR-sovellukseen (Exhaust Gas Recirculation) tarkoitettussa suurnopeuskoneessa oli ollut aiemmin käytössä kuparipäällysteinen massiiviroottori. Sen valmistaminen on kallista ja se soveltuu huonosti massatuotantoon. Teräksinen sileä massiiviroottori ilman kuparipäällystystä on kuitenkin sähköisiltä ominaisuuksiltaan huono. Tämän työn tavoitteena on parantaa sileää massiiviroottoria suunnitteleamalla sen pintaan optimaalinen uritus. Suunniteltavan moottorin nimellispyörimisnopeus on 50 krpm ja nimellisteho 20 kW.

Uritetulle roottorille luotiin Adept-ohjelmaa varten uusi malli, joka soveltui säteen suhteen suorien ja vinojen aksiaalisuuntaisten urien laskentaan. Adeptin laskennallisten tulosten avulla massiiviroottorille optimoitiin uritus, ja sen perusteella valmistettiin yksi prototyyppi. Prototyyppi testattiin ABB:n koekentällä sileän massiiviroottorin lisäksi, jonka jälkeen urituksen vaikutuksia voitiin analysoida myös testitulosten avulla.

Uritus parantaa magneettivuon tunkeutumaa roottorin pinnan sisäosiin, jonka myötä saavutetaan parempi hyötysuhde ja tehokerroin verrattuna sileään massiiviroottoriin. Uritetun roottoripinnan jäähdytys myös tehostuu, koska jäähdytyspinta-ala kasvaa. Roottorin pinnassa vaikuttavat pyörrevirrat ohjautuvat urituksen seurauksena momentin kannalta parempiin suuntiin vähentäen pyörrevirtahäviöitä. Urituksen haittana ovat kasvavat kaasukitkahäviöt, jotka ovat seurausta pinnan rosoisuudesta.

Laskennallisten tulosten perusteella voidaan sanoa urien lukumäärän ja syvyyden kasvun parantavan moottorin sähköisiä suoritusarvoja. Optimaalinen urien leveys on riippuvainen valitusta urien lukumäärästä. Urien lukumäärässä on huomioitava syntyvät värähtelyt roottoriin ja urien syvyydessä roottorin mekaaninen kestävyys. Laskennallisten tulosten perusteella säteen suhteen vinot urat eivät paranna merkittävästi moottorin sähköisiä arvoja.

Laskennallisiin ja testituloksiin vedoten todetaan roottorin urittamisen alentavan merkittävästi sileän massiiviroottorin lämpenemiä. Vertailtaessa uritetun roottorin tuloksia kuparipäällysteiseen massiiviroottoriin jäädytään uritetulla versiolla melko kauas kuparipäällysteisen suoritusarvoista. Erityisesti uritetun roottorin lämpenemä oli huomattavasti suurempi kuin kuparipäällysteisen.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

**KALLIO, VIIVI:** Finding an Optimal Slitting for a High Speed Solid Rotor

Master of Science Thesis, 69 pages, 3 Appendix pages

2014

Major: Power Systems and Market

Examiner: Professor Seppo Valkealahti

Keywords: slitted solid-rotor, solid-rotor, axial slitting, radial curves, skewed slits, high-speed induction motor.

In a high-speed machine used in an exhaust gas recirculation (EGR) application there was used a copper coated solid-rotor. The manufacture of that rotor is expensive and poorly fit for mass production. On the other hand, smooth solid-rotor without the copper coating has poor electrical characteristics. The aim of this work was to improve the smooth solid-rotor by designing an optimal slitting to the surface of the rotor. The designed motor has a nominal speed of 50 krpm and nominal power of 20 kW.

A new slitted rotor model was created for Adept program. The model can be used for rotors with axial slits and with axially curved skews. By applying the results of Adept an optimal slitting was designed for the solid-rotor and a prototype was produced based on calculations. The prototype and the smooth solid-rotor were tested in ABB's testing field in order to compare the effects of the slits to the performance of the smooth solid-rotor.

The slitting improves the depth of flux and current penetration into the rotor. The deeper the slits the better efficiency and power factor can be achieved. The slitting intensifies the cooling of the rotor due to the increased cooling surface. In addition, the slitting increases the high-frequency surface impedance thus decreasing the eddy-current losses. The drawback of the slitting is the increased friction losses due to the rough surface.

According to Adept calculations by increasing the amount of slits and the depth of slits the performance of the motor improves. The optimal width of slits depends on the selected amount of slits. While choosing the amount of slits the mechanical vibrations in the rotor have to be taken into consideration. Furthermore, the depth of slits affects the mechanical strength of the rotor. According to Adept calculations the skewed axial slits did not significantly improve the performance of the motor.

The test results together with calculated results show that by slitting the smooth solid-rotor the temperature rise of the rotor decreases significantly. If the performance of the slitted solid-rotor is compared with the copper coated solid-rotor the latter one has far more better performance. Especially the temperature rise of the surface of the slitted solid-rotor was substantially higher than in the copper coated rotor.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty ABB Motors Oy:n Vaasan yksikössä, jossa työn ohjaajana toimi DI Tero Käsäkangas. Haluan kiittää Teroa erinomaisesta ohjaamisesta työn aikana sekä rakentavista kommentteista työtäni kohtaan. Lisäksi haluan kiittää teknologiapäällikkö Jouni Ikäheimoa diplomityön tekoon palkkaamisesta ja mielenkiintoisen aiheen tarjoamisesta. Lisäksi haluan kiittää DI Matti Fyhriä prototyyppien testausavusta ja käytännön opastuksesta testaukseen liittyen sekä kehittäivistä kommentteista työtäni kohtaan. DI Ville Kivelälle kiitokset avusta ja hyvistä opastuksista prototyyppien testitulosten analysoinnissa. Kiitokset myös moottorin kasaamisesta ja mekaniikkapuolen kysymyksissä auttaneelle DI Jouni Turuselle. Muita yksittäisiä nimiä mainitsematta haluan kiittää viihtyisästä työympäristöstä koko Vaasan Motorsin koekentän työntekijöitä sekä tuotekehitys- ja tuotehallintaosastojen väkeä.

Tampereen teknillisen yliopiston puolelta työn tarkastajana toimi professori Seppo Valkealahti, ja häntä haluan kiittää työni tarkastamisesta ja ohjaavista neuvoista työni parantamiseksi. Lisäksi kiitokset koko yliopistolle sen tarjoamista mielenkiintoisista ja erinomaisen opetuksen sisältävistä kursseista, jotka innostivat suorittamaan tutkintoni loppuun asti.

Lopuksi haluan osoittaa kiitokset DI Eero Viertokoskelle, jonka avulla päädyin Vaasaan ja ABB:n Motorsille. Tärkeä kiitos myös perheelleni ja läheisilleni elämässä tukemisesta, sekä kaikille muille diplomityön teossa minua auttaneille.

Vaasassa 13.3.2014

Viivi Kallio

# SISÄLLYS

1	Johdanto .....	1
2	Johdatus suurnopeustekniikkaan .....	2
2.1	Yleisesti suurnopeuskoneista .....	2
2.2	Sovelluskohteet suurnopeustekniikassa .....	5
3	Suurnopeusmoottorin rakenne .....	8
3.1	Staattori .....	8
3.1.1	Urat ja käämitys .....	9
3.1.2	Ilmavälin pituus .....	11
3.2	Roottori .....	11
3.2.1	Roottorin materiaali ja mitat .....	12
3.2.2	Urituksen vaikutus .....	13
3.2.3	Urien lukumäärä .....	14
3.2.4	Urien syvyys ja muoto .....	15
3.2.5	Urien leveys .....	16
3.2.6	Aksiaaliset, radiaaliset ja vinot urat .....	16
3.2.7	Roottorin päällystäminen .....	18
3.3	Suurnopeuskoneen jäähdytys .....	19
3.4	Suurnopeuskoneen laakerit .....	20
3.5	Taajuusmuuttajakäyttö suurnopeuskoneissa .....	22
4	Sähkömoottorin teho, hyötysuhde ja häviöt .....	24
4.1	Staattorin häviöt .....	25
4.2	Roottorin häviöt .....	26
4.2.1	Sähköiset häviöt .....	26
4.2.2	Mekaaniset häviöt .....	27
5	Urituksen suunnittelu .....	30
5.1	Laskentaohjelmat .....	30
5.1.1	Roottorimallin luominen Lua-koodilla .....	31
5.1.2	Optimointi Optimizer-työkalulla .....	36
5.2	Adeptissa käytetyt parametrit .....	37
6	Laskennalliset tulokset .....	39
6.1	Urien lukumäärän, syvyyden ja leveyden vaikutus .....	39
6.2	Urien vinouden vaikutus .....	43
6.3	Ilmavälin pituuden ja nimellisjännitteen vaikutus .....	44
6.4	Jännitteen muodon vaikutus roottorin häviöihin .....	46
7	Prototyyppien testaus .....	47
7.1	Prototyyppien esittely .....	47
7.2	Testauksen toteutus .....	48
7.3	Testauksessa vastaan tulleita haasteita .....	51
7.4	Testaustulokset .....	52
7.4.1	Mekaanisen värinän ja melun vertailu .....	52

7.4.2	Kitkahäviöiden vertailu .....	52
7.4.3	Siniaaltosuodattimen vaikutus.....	54
7.4.4	Lämpenemien vertailu ja kytkentätaajuuden vaikutus .....	55
7.4.5	Laskentatulosten ja testaustulosten vertailu .....	59
8	Yhteenveto ja jatkotutkimus.....	62
	Lähteet.....	64
	Liite 1: Roottorimallin koodi .....	67

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

$A$	Roottorin uran kulmapiste
$Ag$	Jana roottorin vinossa uramallissa
$B$	Roottorin uran kulmapiste
$b$	Roottorin vinon uramallin sivun pituus
$C$	Kerroin laskettaessa roottoriin vaikuttavaa mekaanista jännitystä
$C_f$	Kitkakerroin
$C_T$	Vääntömomenttikerroin laskettaessa kaasukitkahäviötä
$e$	Roottorin vinon uramallin sivun pituus
$f$	Staattoriin syötettävä taajuus
$f_s$	Taajuusmuuttajan taajuusohje
$f_{sw}$	KytKentätaajuus
$g$	Positiivinen kokonaisluku
$gB$	Jana roottorin vinossa uramallissa
$I$	Nimellisvirta
$I_n$	Yliaaltovirta
$I_1$	Perustaajuusvirta
$J$	Virrantiheys materiaalissa
$J_r$	Roottorin hitausmassa
$k_2$	Nopeuskerroin
$k_f$	Kerroin roottorin pinnan sileydelle
$k_s$	Kokonaislukukerroin tilaharmonisten yliaaltojen laskemiseen
$L_r$	Roottorin pituus
$l_r$	Uritetun roottoriosan aksiaalinen pituus
$n$	Järjestysluku
$m$	Vaiheiden lukumäärä
$O$	Origo
$p$	Napaparien lukumäärä
$P$	Pätöteho
$P_{Cu,s}$	Staattorin kuparihäviöt
$P_{Cu,r}$	Roottorin kuparihäviöt
$P_{exc}$	Staattorin hajahäviöt
$P_{Fe,r}$	Roottorin rautahäviöt
$P_{Fe,s}$	Staattorin rautahäviöt
$P_{f,a}$	Kaasun tangentiaalisesta liikkeestä johtuvat häviöt roottorissa
$P_{fr}$	Kitkahäviö
$P_{fr,end}$	Roottorin päätyjen aiheuttamat kaasuhäviöt

$P_{fr,bearings}$	Moottorin laakerihäviöt
$P_{fr,total}$	Roottorin kaasu- ja kitkahäviöt
$P_{fr,r}$	Kaasukitkahäviö
$P_{fund,r}$	Roottorin vääntömomenttihäviöt
$P_{hyst,r}$	Roottorin hystereesihäviöt
$P_{in}$	Moottorin sisäänmenoteho
$P_{J,r}$	Roottorin Joulehäviöt
$P_{loss}$	Moottorin häviöteho
$P_{mech}$	Moottorin mekaaninen ulostuloteho
$P_{out}$	Moottorin ulostuloteho
$P_{r,loss}$	Roottorin kokonaishäviöt
$P_{s,loss}$	Staattorin kokonaishäviöt
$P_{surf,r}$	Roottorin pyörrevirtahäviöt
$P_{\delta}$	Ilmaväliteho
$Q_2$	Urien lukumäärä
$q_m$	Jäähdyttävän kaasun massanopeus
$Q_r$	Roottorin uraluku
$Q_s$	Staattorin uraluku
$Re_{\alpha}$	Aksiaalisen kaasuvirtauksen Reynoldsin luku
$Re_{\delta}$	Tangentiaalisen kaasuvirtauksen Reynoldsin luku
$r$	Säde
$r_A$	Pisteen A etäisyys origosta
$r_B$	Pisteen B etäisyys origosta
$r_{seg}$	Segmentin säde
$r_r$	Roottorin säde
$r_s$	Uritetun roottorin sisäkehän säde
$r_{sisä}$	Roottorin päätykiekon sisäsäde
$r_{ulko}$	Roottorin päätykiekon ulkosäde
$R$	Uritetun roottorin säde
$s$	Jättämä
$s_v$	Vällys
$S$	Kaaren pituus
$t$	Aika
$T$	Moottorin vääntömomentti
$T_{em}$	Sähkömagneettinen vääntömomentti
$u_r$	Roottorin kehänopeus
$U$	Nimellisjännite
$U_d$	Uran syvyys
$U_{dx}$	Roottorin vinon uramallin x-suuntainen sivu
$U_w$	Uran leveys



$v$	Staattorin kolmivaihekäämityksen synnyttämien tilaharmonisten yliaaltojen järjestysluku
$v_p$	Poissonin kerroin materiaalille
$V$	Tilavuus
$x_A$	Roottorin vinon uramallin x-suuntainen sivu
$x_B$	Roottorin vinon uramallin x-suuntainen sivu
$y$	Roottorin vinon uramallin y-suuntainen sivu
$y_A$	Roottorin vinon uramallin y-suuntainen sivu
$y_B$	Roottorin vinon uramallin y-suuntainen sivu
$\cos(\lambda)$	Tehokerroin
$\sigma_{\max}$	Roottorin pintaan vaikuttava maksimi mekaaninen jännitys
$\sigma_{\tan}$	Roottorin pintaan vaikuttava tangentiaalinen elektromagneettinen jännitys
$\alpha$	Roottorin vinon uramallin kulma
$\beta$	Roottorin vinon uramallin kulma
$\gamma$	Roottorin uran kulma roottorin säteen suhteen
$\delta$	Segmenttikulma
$\delta_1$	Uritetun roottorin pisteen 1 segmenttikulma
$\delta_2$	Urien lukumäärän määrittämä segmenttikulma
$\delta_3$	Uritetun roottorin urien välinen segmenttikulma
$\varphi$	Roottorin vinon uramallin kulma
$\vartheta$	Sisäkehän säteen rajaama kulma
$\rho$	Materiaalin tiheys
$\rho_{\text{air}}$	Ilmavälin kaasun tiheys
$\rho_r$	Materiaalin resistiivisyys
$\eta$	Moottorin hyötysuhde
$\omega_r$	Roottorin pyörimisnopeus
$\omega_s$	Staattorin synnyttämän magneettikentän kulmanopeus
ABB	Asea Brown Boweri
Adept	ABB:n sähkökoneiden suunnitteluohjelma
CHP	Yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto (Combined Heat and Power)
EGR	Pakokaasujen kierrätysjärjestelmä (Exhaust Gas Recirculation)
FCSmek	Adept ohjelmassa oleva elementtimenetelmään perustuva aliohjelma
FEM	Elementtimenetelmä (Finite Element Method)

FEMM	FCSmekin aliohjelma, joka piirtää geometrian mallille ja luo elementtiverkon
HST	High Speed Tech Oy
IGBT	Transistori (Insulated-Gate Bibolar Transistor)
IM	Induktiomoottori
LUT	Lappeenrannan teknillinen yliopisto (Lappeenranta University of Technology)
ORC	Organic Rankine Cycle voimalaitosprosessi
PAM	Pulssinamplitudimodulaatio (Pulse Amplitude Modification)
PID	Proportional-Integral-Derivative –säädin
PM	Kestomagneettikone (Permanent Magnet Machine)
PWM	Pulssinleveysmodulaatio (Pulse Width Modulation)
rpm	Kierrosta minuutissa (Revolutions per minute)
SRM	Molemmin puolin avonapainen reluktanssimoottori (Switched Reluctance Machine)
SynRM	Synkronireluktanssimoottori (Synchronous Reluctance Machine)
TEFC	Suljettu tuuletinjäähdytys (Totally Enclosed Fan Cooled)
THD	Harmoninen kokonaissärö
TKK	Teknillinen korkeakoulu

# 1 JOHDANTO

Yksivaiheinen induktiomoottori on käytetyin moottorityyppi maailmassa, ja teollisissa sovelluksissa sitä käytetään kolmivaiheisena (Karady & Holbert 2013: 541). Induktio-moottorin on alun perin kehittänyt Nikola Tesla, ja sille on myönnetty patentti vuonna 1888. Patentti käsittelee sähkömoottoria, jossa on joko käämitty tai massiiviroottori. (Jarvis 1969) Massiiviroottori on nykyään yksi käytetyimmistä roottorityypeistä suurnopeusmoottorisovelluksissa.

Suurnopeuskoneet pyörivät korkeammilla nopeuksilla kuin on mahdollista saada 50/60 Hz verkkovirrasta ja niissä mekaaninen vaihteisto korvataan sähköisellä. Tämä on mahdollistunut taajuusmuuttaja- ja invertteriteknologian kehityksen myötä. Suurnopeuskoneissa työkone voidaan kiinnittää suoraan moottorin akselille ja pyörimisnopeutta on mahdollista muuttaa taajuusmuuttajalla. (Huppunen 2004: 16)

Suurnopeuskoneen roottorissa on suuri tehotiheys ja mekaaninen kuormitus johtuen suurista nopeuksista ja keskipakovoimasta. Ne asettavat korkeat kriteerit roottorin mekaaniselle kestävyydelle, samalla kun sähkökoneen jäähdytys muodostuu myös entistä haasteellisemmaksi rauta- ja kuparihäviöiden kasvaessa sekä lämmönsiirtopinta-alojen pienentyessä. (Saari 2012: 14)

Diplomityö tehtiin Vaasan ABB Motors & Generators -yksikölle ja työn tavoitteena oli tutkia massiiviroottorin urittamisen vaikutusta moottorin sähköisiin arvoihin ja löytää optimaalisin uritus simulointien ja käytännön mittaustulosten perusteella. Tavoitteena oli päästä kuparipäällysteisen massiiviroottorin sähköisten arvojen tasolle, sillä se on kallis ja vaikeasti ellei jopa mahdotonta valmistaa sarjatuotantona. Mallinnettavana moottorina toimi pakokaasujen takaisinkierrätyssovellukseen EGR (Exhaust Gas Recirculation) tarkoitettu 20 kW:n suurnopeusmoottori, jonka pyörimisnopeus on 50 000 rpm. Roottorina on teräksinen massiiviroottori, jonka päädyissä on 30 mm leveät teräksiset oikosulkurenkaat. Laskenta ohjelmistona käytettiin Adeptia ja sen aliohjelmista erityisesti FCSmekiä. Simulointitulosten perusteella valmistettiin yksi prototyyppi, joka testattiin sileän massiiviroottorin lisäksi ABB:n koekentällä.

Työn sisällössä kappale 2 toimii johdatuksena suurnopeustekniikkaan ennen kuin kappaleessa 3 esitellään staattorin ja roottorin rakennetta sekä jäähdytys ja laakeri tekniikoita. Kappaleessa 4 syvennyttään vielä moottorien tehoon, hyötysuhteeseen ja häviöihin ennen kuin kappaleessa 5 ryhdyttään suunnittelemaan roottorin uritusta. Kappaleessa 6 esitellään laskennalliset tulokset ja kappaleessa 7 syvennyttään testaukseen ja saatuihin käytännön mittaustuloksiin. Viimeinen kappale 8 toimii yhteenvedona koko työlle.

## 2 JOHDATUS SUURNOPEUSTEKNIikkaAN

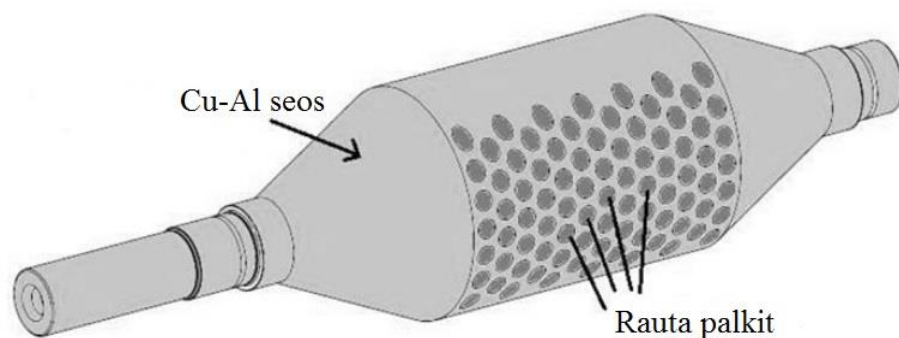
Suomessa suurnopeustekniikkaa on lähdetty kehittämään 1980-luvun alkupuolella, kun ensimmäinen julkinen rahoitus myönnettiin turbokonesovelluksen kehittämiseen. Siitä eteenpäin on Suomessa Lappeenrannan teknillisen yliopiston (LUT), Aalto yliopiston (ent. TKK) ja teollisuuden yhteistyönä toteutettu useita tutkimushankkeita, joiden tuloksena on muun muassa syntynyt kaksi nykyisin keskiuureksi kasvanutta yritystä. Tuotteiden kaupallistuminen mahdollistui, kun 1990-luvun alkupuolella markkinoille tulivat IGBT-transistoripääteasteita (Insulated-gate Bipolar Transistor) käyttävät taajuusmuuttajat. Ensimmäinen kaupalliseen käyttöön tarkoitettu tuote oli ilmastuskompressori, joka toimitettiin vuonna 1994. Tällä hetkellä yliopistoissa tutkimus on jakautunut kolmeen laboratorioon, joista kaksi sijaitsee LUT:issa ja yksi Aalto yliopistossa. (Larjola, Arkio & Pyrhönen 2010: 3, 16, 18)

Larjola ym. (2010) määrittelee suurnopeustekniikaksi järjestelyä, jossa sähkökone (moottori tai generaattori) ja toimilaite (turbiini, kompressori, pumppu, työstökoneen kara) on kytketty suoraan mekaanisesti yhteen ilman vaihdetta, ja missä yhteisen roottorin pyörimisnopeus on selvästi suurempi kuin 50 Hz verkosta syötetyn kaksinapaisen vaihtovirtasähkökoneen synkroninopeus 3000 rpm. Koneen laakerit ovat usein öljyttömiä kaasui- tai magneettilaakereita tai kiertoainevoideltuja mekaanisia laakereita. Usein suurnopeussähkökonetta myös ohjataan tehoelektronisella taajuusmuuttajalla. (Larjola ym. 2010: 7)

### 2.1 Yleisesti suurnopeuskoneista

Tyypillisesti suurnopeuskoneiden pyörimisalue on 10 000 rpm – 100 000 rpm välillä, mikä on huomattavasti perinteistä sähkökoneen pyörimisnopeutta suurempi, mutta suurnopeustekniikan sovelluksiksi luetaan kaikki yli 10 000 rpm pyörimisnopeussovellukset. Suurnopeuskoneet kytketään verkkoon taajuusmuuttajan välityksellä, jolloin niiden pyörimisnopeutta voidaan ohjata taajuusmuuttajan syöttötaajuutta vaihtamalla. Suuren pyörimisnopeuden myötä roottoriin vaikuttaa entistä suurempi keskipakovoima, joka asettaa suurempia mekaanisia vaatimuksia suurnopeusroottorille verrattuna perinteiseen roottoriin. Suuremman tehotiheyden lisäksi suurnopeuskoneiden pienemmän laitekoon myötä mekaaniset rasitukset lisääntyvät ja lämpötilan nousu kasvaa, joka vaatii materiaaleilta ja jäähdytysratkaisuilta tehokkaampaa ja kestävämpää toimintaa. Näin ollen myöskään perinteiset laakerit eivät sovellu suurnopeuskoneisiin. Suurnopeuskoneen suunnittelu vaatii useamman tekniikan alan soveltamista, vastaan tulee sähkö-, kone-, lämpö-, virtaus- ja materiaalitekniikan kysymyksiä. Näiden lisäksi on myös huomioitava valmistustekniset ja kaupalliset tekijät. (Saari 2012: 17)

Suurnopeustekniikassa käytetään pääasiassa kolmea sähkökonetyyppiä: oikosulukonetta IM (Induction Machine), kestopagneettikonetta PM (Permanent Magnet machine) ja reluktanssikonetta. Reluktanssikonetta on kahden tyyppisiä, on synkronireluktanssikone SynRM (Synchronous Reluctance Machine) ja molemmiin puolin avonapainen kone SRM (Switched Reluctance Machine) (Kokkonen 2007: 20). Induktiokone on näistä vanhin ja kaikista käytetyin konetyyppi. IM-koneita pidetään toiminnaltaan tahtikoneita (PM, SynRM ja SRM) luotettavampina, mutta hyötysuhteeltaan ja tehokertoimeltaan huonompina. PM-kone on sähköisiltä ominaisuuksiltaan selvästi IM-konetta parempi, mutta mekaaniselta ja termiseltä kestävyydeltään huonompi. Ongelmaksi muodostuvat magneettien kiinnitys roottorin pintaan. Lisäksi roottorin pyörrevirtahäviöt kasvavat merkittävästi pyörimisnopeuden kasvaessa, vaikka kuparihäviöitä PM-koneessa ei ole. Tämän vuoksi roottorin kehänopeuden ollessa yli 250 m/s käytetään yleensä mieluummin IM-konetta ja alhaisemmissa kehänopeuksissa taas PM-konetta. (Saari 2012: 14, 18, 22, 23, 28) SynRM roottoriin on valettu radiaalisuuntaisia rautapalkkeja ja materiaalina on kupari-alumiini seos, kuva 1. Rakenteen yksinkertaisuuden vuoksi sen valmistaminen on helppoa ja sen mekaaninen kestävyys on myös todettu riittäväksi. SRM koneen vääntömomentissa on esiintynyt suurta värinää, joka on alentanut sen suorituskykyä ja käyttökohteita (Kokkonen 2007: 20). SynRM koneiden tutkimus on ollut alalla vielä vähäistä, mutta harvat tutkimustulokset antavat erittäin lupaavia odotuksia hyödyntää tulevaisuudessa SynRM koneita suurnopeustekniikassa. (Ikäheimo, Kolehmainen, Käsäkangas, Kivelä & Moghaddam 2013)

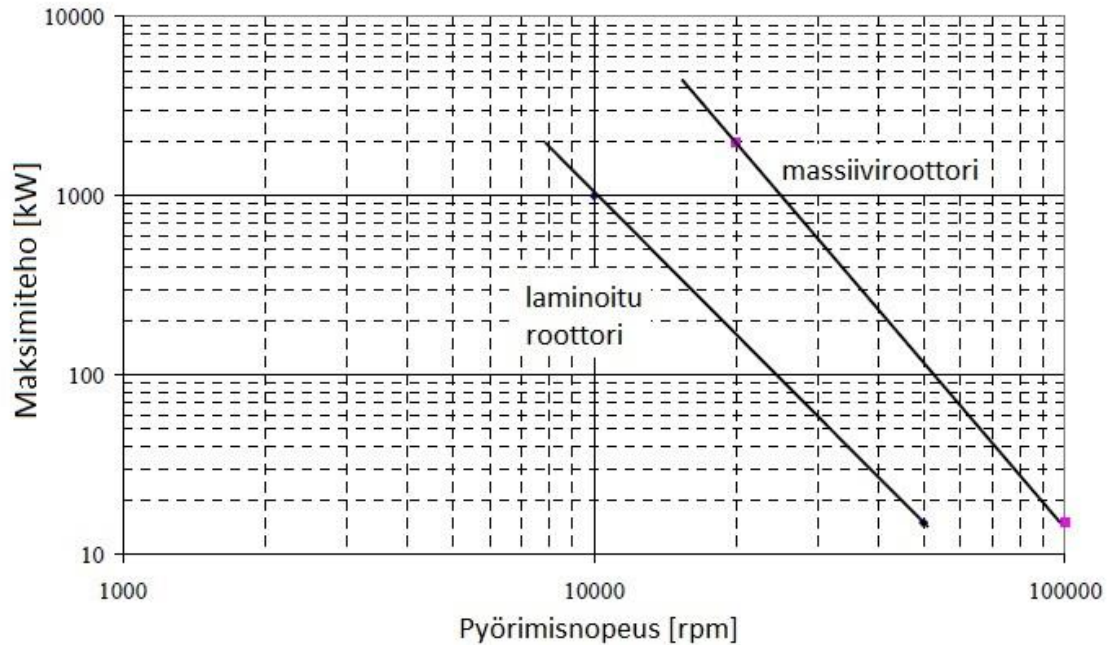


**Kuva 1.** Reluktanssiroottorin malli suurnopeussovellukseen (Ikäheimo ym. 2013).

Suurnopeuskoneen roottorina voidaan käyttää joko rakenteeltaan yhtenäistä massiiviroottoria tai laminoitua levyroottoria, jossa akselin päälle on asennettu hyvät magneettiset ominaisuudet omaavia sähkölevyjä. Levyroottorissa akseli on ohuempi ja se asettaa rajoituksia roottorin pyörimisnopeudelle. Tästä syystä massiiviroottoria käytetään yleisemmin, koska se kestää suurempia pyörimisnopeuksia ja sen rakenne pysyy stabiilimpana. (Saari 2012: 26) Muita massiiviroottorin etuja ovat muun muassa yksinkertainen rakenne, helppo valmistus, korkea luotettavuus ja korkea lämmönkestävyys (Huppunen 2004: 24)

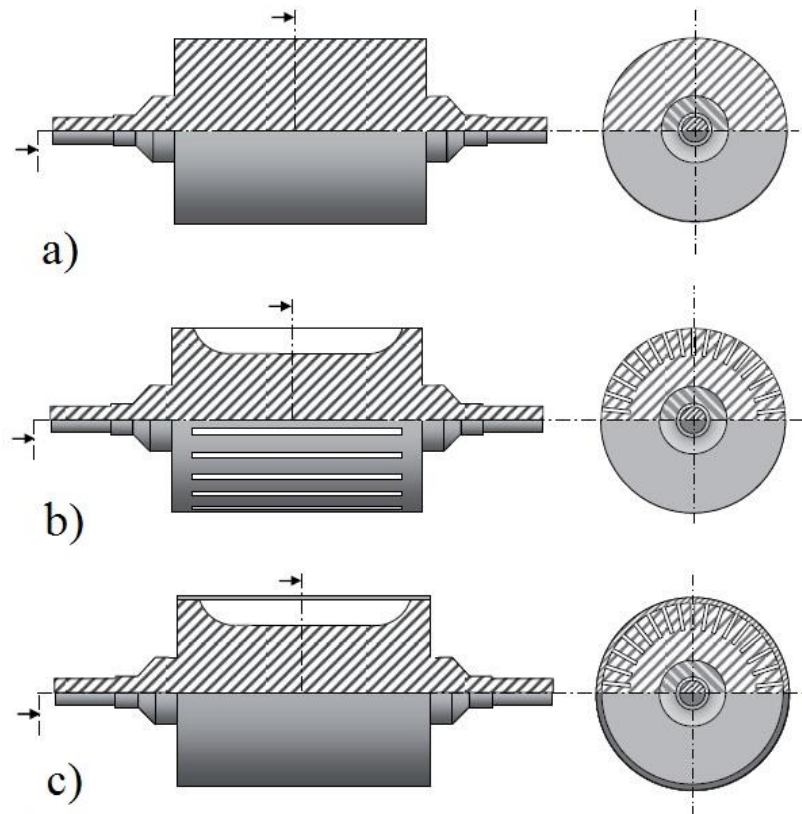
Massiiviroottoreiden sovellusalue alkaa pyörimisnopeuksista, joissa laminoitu roottori ei ole enää mekaanisesti riittävän kestävä. Laminoitun roottorin pyörimisnopeus-

alue on 10 000 – 50 000 rpm välillä tehon liikkua kilowateista megawatin luokkaan, kuva 2. Massiiviroottorille pyörimisnopeusalue on 20 000 – 100 000 rpm, mutta on huomioitava, että pyörimisnopeuden yläraja on määritetty teoreettisesti vain mekaanisen kestävyuden rajoittamana. Käytännössä terminen kestävyys on koneiden suunnittelua rajoittava tekijä. (Huppunen 2004: 18 - 19)



**Kuva 2.** Laminoidun roottorin ja massiiviroottorin teho pyörimisnopeuden suhteen käytetyn roottori materiaalin (teräs) vahvuuden ollessa 700 MPa (Huppunen 2004: 19).

Ennen taajuusmuuttajien kehitystä sileitä massiiviroottoreita, kuva 3 a), käytettiin induktiokoneissa tavallisella 50 Hz verkkotaajuudella ja nopeudella, jolloin niiden suorituskky ei yltänyt laminoitujen levyroottoreiden suoritustasolle. Taajuusmuuttajien kehityksen myötä siirryttiin suuriin pyörimisnopeuksiin, jolloin ferromagneettisesta kappaleesta valmistetun yhtenäisen massiiviroottorin mekaaninen ja termien kestävyys muodostui suorituskvyltään hyväksi. Massiiviroottorin helpohko ja halpa valmistus sekä ferromagneettisen materiaalin saatavuus ovat edistäneet tutkimuksia. (Aho 2007: 13)

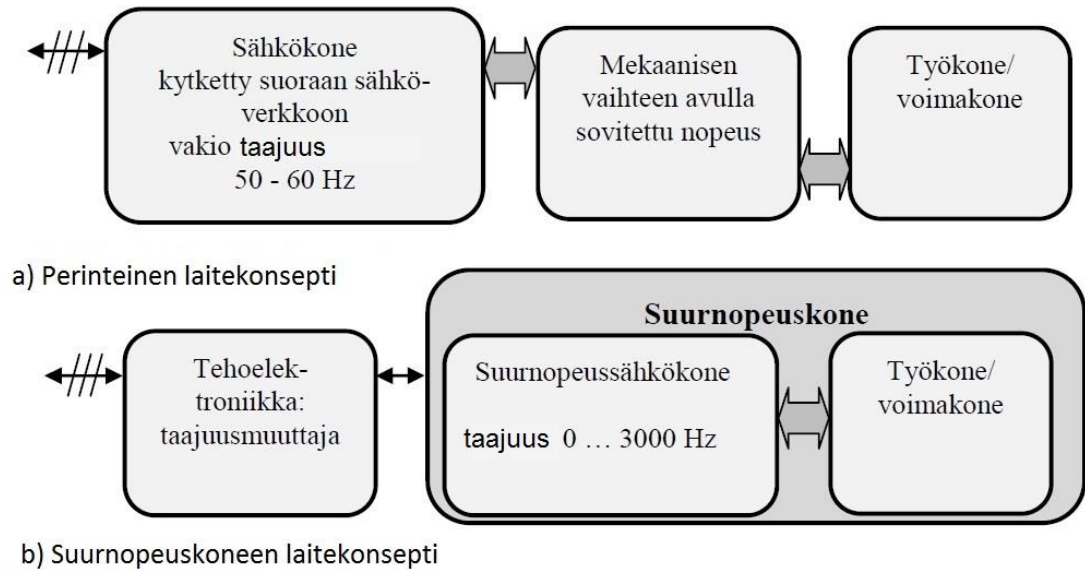


**Kuva 3.** Massiiviroottorimalleja: a) sileä, b) aksiaalisesti uritettu ja c) aksiaalisesti uritettu ja päällystetty roottori (Aho 2007: 39).

Sileän massiiviroottorin sähköisiä ominaisuuksia voidaan parantaa urittamalla roottorin pinta aksiaalisesti, kuva 3 b), tai vielä päällystämällä esimerkiksi kuparilla aksiaalisesti uritettu roottori, kuva 3 c). Päällystämällä voidaan vähentää pyörrevirta-, kaasua ja kitkahäviöitä (Aho 2007: 106). Yhtenäinen massiiviroottori kestää siis parhaiten keskipakovoiman rasituksia mahdollistaen suuret pyörimisnopeudet. Sen terminen kestävyys on korkea, se on helppo suojata kemikaaleilta ja sillä on korkea luotettavuus (Hupponen 2004: 24). Näin ollen se on käytetyin roottorimalli suurnopeuskoneissa. (Saari 2012: 18, 26)

## 2.2 Sovelluskohteet suurnopeustekniikassa

Suurnopeuskoneen laitekonseptin merkittävin hyöty perinteiseen laitekonseptiin verrattuna tulee mekaanisen vaihteen poistumisesta, jolloin sähkö- ja työkonetta voidaan rakentaa samalle pyörivälle akselille eli roottorille. Kuvassa 4 esitetään perinteisen ja suurnopeuskoneen laitekonsepti. Suurnopeussovelluksissa oleva taajuusmuuttaja mahdollistaa suuret pyörimisnopeudet, ja vaihtamalla sen syöttötaajuutta voidaan helposti ohjata työkonetta pyörimisnopeutta. Suurnopeustekniikalla aikaansaadaan suurempi tehotehoteho verrattuna perinteiseen konseptiin, ja siten laitteiden koot saadaan myös pienemmiksi ja kevyemmiksi.



**Kuva 4.** Laitekonsepti, jossa a) perinteinen laitekonsepti ja b) suurnopeuskoneen laitekonsepti (Saari 2012: 13)

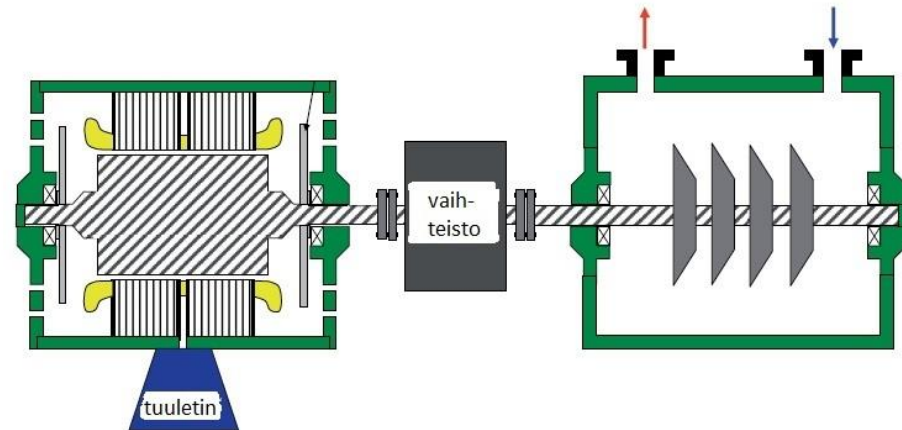
Suurnopeuskoneessa ei tule vaihteistohäviöitä ja laakerihäviöt voidaan minimoida kontaktittomilla magneettilaakereilla. Kuitenkin mekaaniset ja sähköiset häviöt voivat lisääntyä kaasu-, kitka-, rauta- ja kuparihäviöinä taajuuden kasvaessa. Myös jäähdyttäminen muodostuu haasteellisemmaksi kasvavien rauta- ja kuparihäviöiden ja pienempien lämmönsiirtopinta-alojen johdosta, tosin materiaalien kehitys on helpottanut tilannetta. (Saari 2012: 13 - 14)

Suurnopeuskoneista saadaan kokonaishyötysuhteeltaan parempia ja vähemmän energiaa kuluttavia ja siten niitä on käytetty varsinkin hajautetussa energiantuotannossa, mutta myös teollisuudessa, esim. hukkaenergian hyödyntämisessä, kompressoreissa ja kylmäkoneissa (Saari 2012: 13 - 14). Nykyään suurnopeuskoneita käytetään paljon teholuokassa 30 - 100 kW pyörimisnopeuksien ollessa 20 000 - 60 000 rpm. Suuret pyörimisnopeudet parantavat työprosessia monissa sovelluksissa kuten kompressoreissa, pumpuissa ja tuulettimissa. Esimerkiksi sorvaus- tai jyrsinkoneessa leikkauslaatu paranee ja koneen työaika pienenee suurnopeuskoneella. Merkittäviä etuja aiheutuu myös koneen vaihteettomuudesta, joka alentaa meluhaittoja, öljyämisen ylläpitokuluja ja mekaanisesti kuluvia osia, joiden lisäksi kone saadaan pienemmäksi ja kompaktimmaksi. (Gessese 2012: 3 - 4)

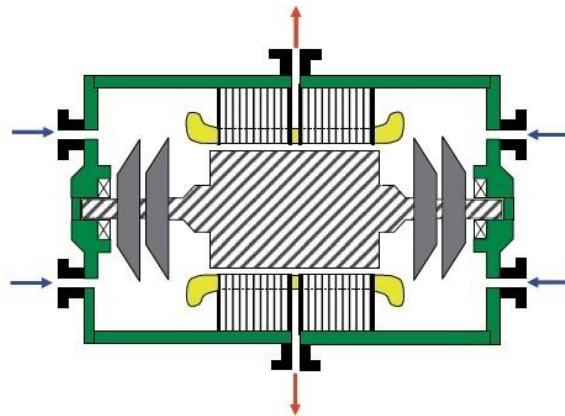
Suurin potentiaali suurnopeuskoneille sijaitsee turbokonesovelluksissa, koska niissä pyörimisnopeudet ovat tyypillisesti korkeita. Perinteinen tapa tällaisen sovelluksen valmistamiseen sisälsi erillisen moottorin ja nopeutta kasvattavan vaihteiston, kuva 5 a). Nykyisellä suurnopeustekniikalla toteutetussa integroidussa laitekokonaisuudessa, kuva 5 b), on mahdollista yhdistää kompressorin suoraan moottorin akselille, jolloin laitteen koko pienenee, kustannukset vähenevät, akseliin ei tarvita tiivisteitä ja moottorin jäähdytys voidaan toteuttaa työstökaasulla. Jos vielä käytetään magneettilaakereita, aikaan-



saadaan täysin ilmatiivis ja öljytön laitekokonaisuus, joka soveltuu putkistoihin ja merenalaisiin pumppusovelluksiin. (Aho 2007: 19 - 20)



a) Sähkömoottori ja turbokompressorit



b) Integroitu sähkömoottori ja turbokompressorit

**Kuva 5.** a) Perinteinen turbokonesovellus, jossa sähkömoottori ja turbokompressorit ovat erillään. b) Suurnopeustekniikalla toteutettu integroitu sähköinen moottori ja turbokompressorit (Aho 2007: 19).

Konkreettinen esimerkki kaupallistetusta tuotteesta on ORC-voimala (Organic Rankine Cycle), joka on LUT:in ja HST:n (High Speed Tech Oy) yhdessä kehittämä tuote. Voimalaitosprosessissa käytetään kiertoaaineena veden sijasta orgaanista työainetta ja se on siten vesihöyryprosessia edullisempi vaihtoehto tuotettaessa sähköä hukkalämmöstä (esim. dieselin pakokaasuista) tai muusta polttoaineesta (biokaasu, kaatopaikkakaasu, biomassa). Voimalassa turbiinilla, generaattorilla ja syöttöpumpulla on yhteinen suurnopeusroottori ja sen laakerit voidellaan kiertoaaineella, jolloin voimala on täysin ilmatiivis ja sen huollontarve on vähäinen. (Larjola 2010: 23) Suomeen on Toholammelle rakennettu ORC-tekniikkaan perustuva yhdistetyn lämmön- ja sähköntuotannon CHP (Combined Heat Power) voimalaitos vuonna 2013, joka on laatuaan ensimmäinen Suomessa. Voimala toimii kuumaöljykierrolla ja leijupetikattilassa on joustava polttoainevalikoima, korkea hyötysuhde, sekä alhaiset päästöt ja elinkaarikustannukset. (Tekes 2013)

### 3 SUURNOPEUSMOOTTORIN RAKENNE

Induktiokoneen toiminta perustuu staattorin synnyttämän vaihtosähkökentän roottoriin indusoimaan sähkövirtaan, joka muodostaa magneettikentän roottorin ympärille. Näin staattorin ja roottorin välille muodostuu magnetomotorinen voima, jonka seurauksena roottori lähtee seuraamaan staattorin pyörivää magneettikenttää. Induktiokoneissa roottorin pyörimisnopeudessa on kuitenkin pieni jättämä staattorikentän pyörimisnopeuteen nähden (generaattoreissa edistämä), jonka myötä induktio-koneita kutsutaan epätahtiko-neiksi. (Saari 2012: 96)

Suurnopeusmoottorit tulee suunnitella niin, että ne toimivat hyvin yhdessä taajuus-muuttajan kanssa. Tärkeintä on tarkastella kokonaisuutta, sillä yhdellä muutoksella voi olla vaikutusta useampaan ominaisuuteen. (Lähtenmäki 2002: 16) Suurnopeuskoneissa suuren syöttötaajuuden myötä rautahäviöt kasvavat lisäten jäähdytystarvetta, joka staattorin ja roottorin ilmarälin kautta tehtynä jäähdytysilmarävirtauksena lisää roottorin kaasukitkahäviöitä. Staattorin rauta- ja kuparihäviöt sekä roottorin pyörrevirtahäviöt aiheut-tavat tehohäviöitä, jotka muodostuvat merkittävän suuriksi oikosulkukoneissa suurten oikosulkuvirtojen myötä. Näitä voidaan minimoida optimaalisilla materiaaliominaisuuksilla, kun materiaalivalinnoissa otetaan huomioon sähköisten ja magneettisten ominaisuuksien lisäksi vaadittavat mekaaniset lujuudet. (Saari 2012: 28)

Suurnopeusmoottorin suunnittelua ohjaavat sen suuri tehotiheys ja aktiivisen jäähdytyksen tarve. Kuitenkin ehkä tärkein suunnittelua ohjaava tekijä on saada roottorin pinnalle mahdollisimman tasainen sinimuotoinen vuo, koska muussa tapauksessa yliaaltokomponentit aiheuttavat merkittäviä häviöitä erityisesti massiiviroottoreissa. Ensimmäisenä vaihtoehtoisena ratkaisuna on saada staattorin käämityksen muodostama magnetomotorinen voima mahdollisimman sinimuotoiseksi eli vähentää käämityksen harmonisia komponentteja. Toinen vaihtoehtoinen ratkaisu on tehdä ilmarälin permeanssista mahdollisimman tasainen. Molempia ratkaisuja voidaan käyttää samanaikaisesti ilmarälinvuon yliaaltokomponenttien pienentämiseen. (Lähtenmäki 2002: 19)

Seuraavissa luvuissa 3.1 – 3.5 esitellään tarkemmin ensin staattorin ja roottorin rakennetta, jonka jälkeen tarkastellaan jäähdytys- ja laakeriratkaisuja. Viimeisenä syvennytään taajuusmuuttajakäyttöön.

#### 3.1 Staattori

Tässä työssä keskitytään tarkemmin roottorin suunnitteluun, mutta kokonaiskuvan kannalta esitellään staattorin rakenteesta urat, käämitys ja ilmarälin pituuden vaikutus. Niillä on merkittävä vaikutus roottorin toimintaan ja siten koko koneen suoritusarvoihin.

Suurnopeusmoottori on perinteistä moottoria herkempi staattorikäämyksen yliaalloille eli magnetomotorisen voiman synnyttämän vuon epätasaisuudelle ilmapälissä. Näitä voidaan vähentää lisäämällä urien lukumäärää staattorissa tai käyttämällä kaksi-kerroskäämintä. Käytännössä mitä enemmän uria on tilan sallimissa rajoissa mahdollista asentaa, sen parempi. (Lähtenmäki 2002: 19) Hyvin suunnittelemalla voidaan moottorin yliaaltojen häviöt alentaa saman tehoisen perinteisen oikosulkuhäkkimoottorin tasolle ja huonosti suunnittelemalla voidaan heikentää merkittävästi koko moottorin suorituskykyä. (Huppunen 2004: 85)

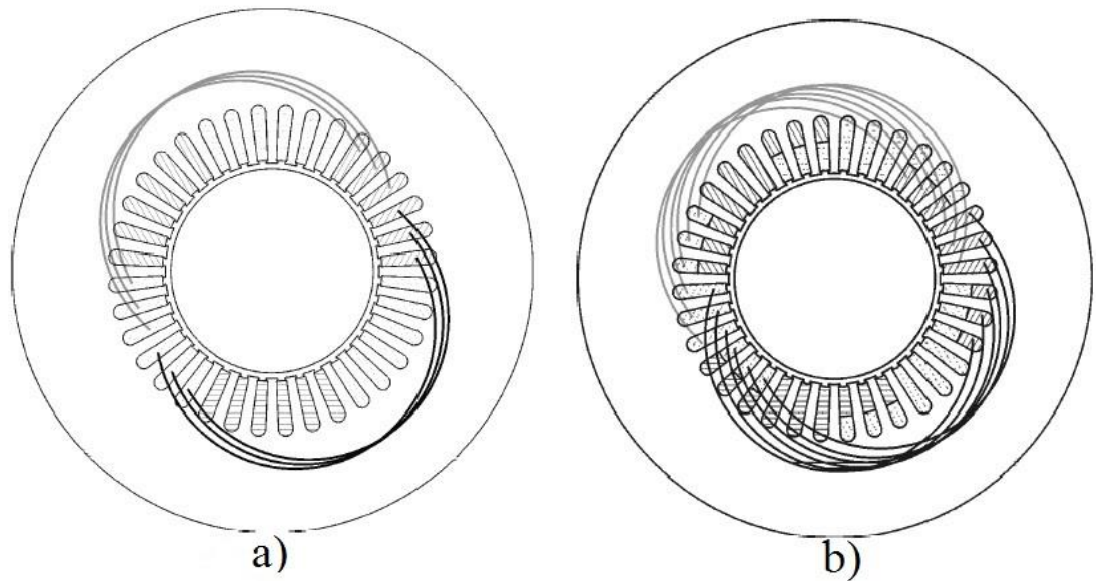
### 3.1.1 Urat ja käämitys

Sähkömagneettinen vääntömomentti muodostuu roottoriin indusoituneen virran ja ilmapälän magneettikentän vuorovaikutuksesta, joista molemmat perustuvat staattorin luomaan muuttuvaan magneettikenttään. Siten staattorin suunnittelulla voidaan vaikuttaa merkittävästi vääntömomenttiin ja roottorin pinnassa vaikuttaviin pyörrevirtahäviöihin. Kolmivaiheinen staattorikäämyksellinen luo ainoastaan parittomia yliaaltoja ilmapäliin. Tilaharmonisten yliaaltojen järjestysnumerot saadaan yhtälöstä

$$v = 2mk_s + 1, \quad k_s = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \quad (1)$$

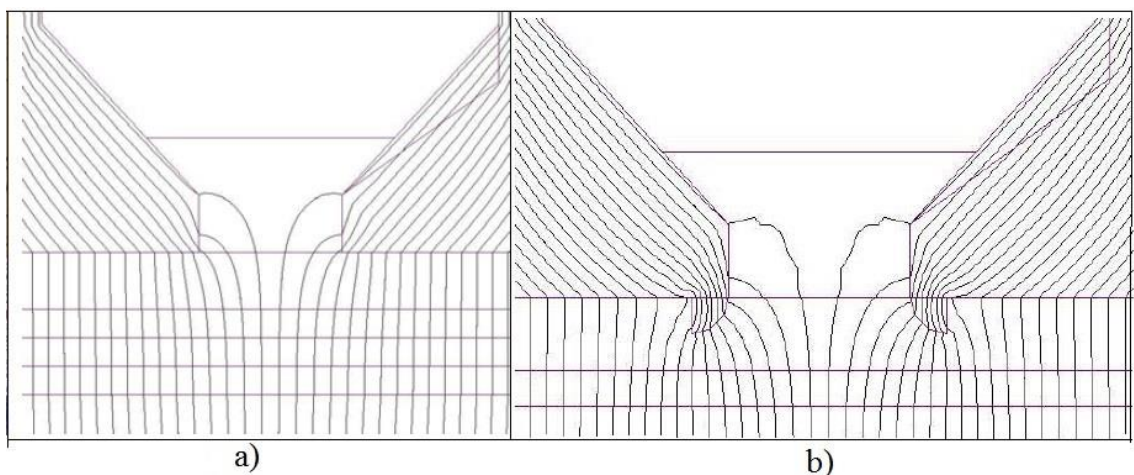
missä  $m$  on vaiheiden lukumäärä. Staattorin kolmivaihekkäämyksen luomat yliaallot ovat siis järjestysluvultaan  $v = 1, -5, 7, -11, 13, -17, 19, \text{jne.}$

Kolmivaihemoottoreissa 5. ja 7. yliaalto synnyttävät 6. harmonisen yliaaltovirran roottorin pinnalle, josta aiheutuu pulssimainen vääntömomentti, joka vaikuttaa kuusinkertaisella taajuudella roottoriin aiheuttaen tärinää koko moottoriin. (Aho: 2007: 91 - 93) Indusoituvaa 6. harmonista yliaaltovirtaa voidaan alentaa staattorin 5/6 käämityksellä. Kyseinen käämitys alentaa joka toista yliaaltoparia ja sen vaikutus näkyy erityisesti 5. ja 7. yliaallossa. Staattorin 5/6 käämitys, kuva 6 b), vaatii staattorin uraluvun olevan jaollinen  $2pm:llä$ , missä  $p$  on napaparien lukumäärä. Siten kaksinapaiselle 3-vaihemoottorille mahdolliset staattorin uraluvut ovat 12, 24, 36, 48, 60, jne. (Huppunen 2004: 76)



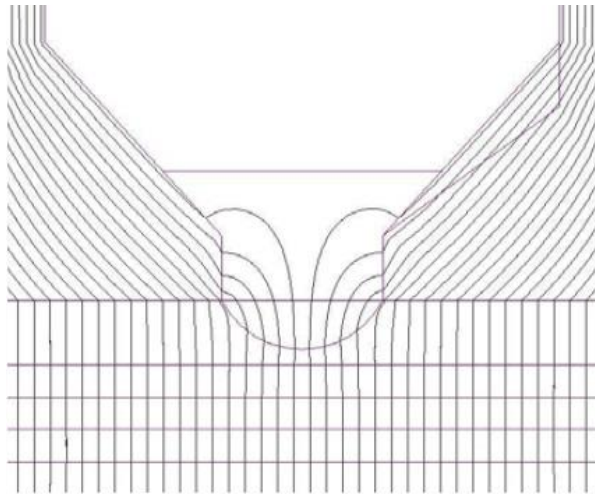
**Kuva 6.** Yksivaiheinen käämitys 36 uraiselle staattorille, a) kokonainen jako (yksi kerros) ja b) 5/6 jako (kaksi kerrosta) käämitys (Lähteenmäki 2002: 20).

Staattorin uramäärän lisäksi myös urien muodolla on vaikutusta ilmapälin magneettikenttään. Urien muotoa muokkaamalla voidaan vähentää magneettivuon vääristymää ilmapälinssä, mikä aiheuttaa uraharmonisia yliaaltoja. Kuva 7 havainnollistaa magneettivuota staattorin urassa, a) edustaa perinteistä puoliavointa uraa ja b) edustaa nystyröillä muokattua uraa. Uran molemmiin puolin asennetut neljäosaympyrän muotoiset nystyrät ohjaavat magneettivuota tasaisemmaksi uran alapuolella ilmapälinssä verrattuna perinteiseen puoliavoimeen uramuotoon. Valitettavasti pienten ja kovien nystyröiden asentaminen on aiheuttanut ongelmia, jonka myötä nystyröiden käyttöä voidaan harkita vaihtoehtoksi vain ison runkokoon moottoreihin. (Huppunen 2004: 80)



**Kuva 7.** Staattorin ura muodon vaikutus magneettivuohon, a) perinteinen muoto ja b) nystyröillä muokattu muoto (Huppunen 2004: 72, 80).

Magneettisesti tehokkain tapa eliminoida magneettivuon vääristymä ilmavälissä on käyttää puolimagneettisesta materiaalista valmistettuja urakiiloja. Magneettivuon kulku urakiilaa käytettäessä on havainnollistettu kuvassa 8.



**Kuva 8.** Staattorin magneettivuo käytettäessä urakiilaa (Huppunen 2004: 82).

Urakiilat ohjaavat magneettivuon tasaiseksi staattorin uran alapuolelta ilmaväliin ja edelleen roottorin pintaan. Haittapuolia aiheutuu pitkän urakiilan valmistusmenetelmän vaikeudesta ja urakiilan kestävyydestä tietyissä tapauksissa. (Huppunen 2004: 81)

### 3.1.2 Ilmavälin pituus

Staattorin ja roottorin välissä on aina pieni ilmaväli. Ilmaväliä tarvitaan erityisesti jäähdytyksen toteuttamiseen, mutta ilmavälin pituus vaikuttaa myös magneettivuon mahdollisuuden tasoittua ennen roottorin pintaa. Staattorin ja roottorin urat aiheuttavat ilmaväliin rosoisuutta, joka lisää yliaaltoja ilmavälin magneettikenttään ja aiheuttaa pyörrevirtähäviöitä roottorin pinnalle. Tehokas ja eniten käytetty tapa vähentää näitä yliaaltoja on ilmavälin pituuden kasvatus. (Aho 2007: 105)

Ilmaväliä kasvattamalla saadaan magneettivuo tasoittumaan ilmavälissä ennen roottorin pintaa. Haittapuolena on, että pitempi ilmaväli kasvattaa tarvittavaa magnetointivirtaa staattorissa. Sen myötä staattorin kuparihäviöt kasvavat, ja moottorin tehokerroin alenee. Ilmavälin pituutta määritettäessä on pyrittävä optimoimaan pyörrevirta-, kupari- ja rautahäviöt tehokertoimen sallimissa rajoissa. (Huppunen: 2004: 78 - 79)

## 3.2 Roottori

Luvussa 2.1 todettiin yhtenäisten massiiviroottoreiden olevan mekaanisesti ja termisesti kestävämpiä kuin laminoitujen levyroottoreiden, joka on edistänyt niiden käyttöä suurnopeussovelluksissa. Tässä työssä tutkitaan massiiviroottorin uritusta, joten roottorin rakennetta esitellään massiiviroottorien kannalta.

Roottorin mitoituksessa tulee huomioida roottorin ominaistajuudet, jotka vaikuttavat roottorin toiminta-alueeseen. Ensimmäinen vaihtoehto on mitoittaa roottori toimi-



$$\sigma_{\max} = C\rho r^2 u_r^2, \quad (3)$$

missä  $\rho$  on materiaalin tiheys ja  $u_r$  roottorin kehänopeus. Kerroin  $C$  riippuu roottorin rakenteesta ja sileälle homogeeniselle sylinterille se on

$$C = \frac{3+v_p}{8}, \quad (4)$$

missä  $v_p$  on Poissonin kerroin vastaavalle materiaalille, esimerkiksi teräkselle 0,29 ja kuparille 0,34. (Aho 2007: 21 - 22)

Pyrhösen, Nergin, Kurrosen & Lauberin (2010) kehittämä kaasukompressorisovelukseen soveltuva induktiokone rakennettiin umpiteräksisestä, pinnaltaan aksiaalisesti uritetusta massiiviroottorista, koska suurnopeuskoneen käyttöolosuhteet eivät sallineet kupariosien käyttöä. Pyrhönen toteaa testaustulosten perusteella teräsmateriaalin takaavan riittävän vääntömomentin pienellä jättämällä. Ahon, Sihvon, Nergin & Pyrhösen (2007) laskennalliset tulokset tukevat tätä testitulosta, koska teräksellä on alhainen resistiivisyys. (Saari 2012: 27)

### 3.2.2 Urituksen vaikutus

Täysin sileäpintaisella roottorilla on hyvät mekaaniset ja aerodynaamiset ominaisuudet, mutta sen sähkömagneettiset ominaisuudet ovat suhteessa huonot (Aho ym. 2007). Tämän takia roottoriin on edullista koneistaa aksiaalisuuntaisia uria, jotka parantavat magneettivuon tunkeutumaa roottorin pinnan sisäosiin. (Saari 2012: 27) Näin saavutetaan parempi tehokerroin ja hyötysuhde kustannusten pysyessä suhteessa vähäisinä (Huppunen 2004: 24). Myös roottorin jäähdytys paranee, koska jäähdytyspinta-ala kasvaa (Aho 2007: 23).

Elementtimenetelmällä FEM (Finite Element Method) erilaisia kiinteitä roottorirakenteita tutkineet Zhou ja Wang (2007) vertailivat roottorin nopeutta, jännitystä, sähkömagneettista momenttia ja häviöitä eri rakenteiden välillä. Parhaimmat mekaaniset ominaisuudet olivat sileäpintaisella ja uritetulla roottorilla kun taas parhaimmat sähköiset ja magneettiset ominaisuudet olivat uritetulla kuparipäällysteisellä ja sileäpintaisella kupariholkkiakseliin kiinnitetyllä roottorilla. (Saari 2012: 27)

Urituksella on myös merkittävä vaikutus pinnan pyörrevirtoihin, sillä urat ohjaavat pyörrevirtoja momentin kannalta mieluisimpiin suuntiin (Huppunen 2004: 47). Jättämä vaikuttaa merkittävästi vääntömomenttiin ja sekin tulee huomioida uritusta suunniteltaessa (Huppunen 2004: 121). Urituksen lisäksi ei-magneettisten, mutta hyvin sähköä johtavien oikosulkurenkaiden lisääminen roottorin päihin parantaa roottorin sähkömagneettisia ominaisuuksia. Huppunen kuvaa väitöskirjassaan omaan käytännön kokemukseensa perustuen oikosulkurenkaiden kaksinkertaistaneen roottorin momentin tietyllä jättämällä. (Huppunen 2004: 23) Kuitenkin suurten kehänopeuksien aiheuttama keskipakovoima, terminen jännitys ja vaatimus korroosion kestolle asettavat vaatimuksia oikosulkurenkaiden materiaalille (Aho 2007: 21).

### 3.2.3 Urien lukumäärä

Roottorin urien lukumäärä  $Q_r$  tulee valita suhteessa staattorin urien lukumäärään  $Q_s$ , jotta voidaan vähentää ei-synkronisia ja synkronisia vääntömomentin harmonisia yliaaltoja sekä vähentää roottoriin syntyvää värähtelyä. Yleisesti ottaen suositellaan, että

$$Q_r < 1,25 \cdot Q_s, \quad (5)$$

jotta ei-synkroniset vääntömomentin harmoniset saadaan vähennettyä. Urien avaumien synnyttämien synkronisten vääntömomentin harmonisten välttämiseksi roottorin uraluvun suhteessa staattorin uralukuun tulee toteuttaa seuraava yhtälö

$$Q_r \neq Q_s \neq \frac{1}{2}Q_s \neq 2Q_s \quad (6)$$

Urien avaumat tuottavat myös vaarallisia harmonisia, joiden välttämiseksi uralukumäärän tulee toteuttaa vielä myös seuraavat yhtälöt

$$Q_r \neq Q_s \pm 2p; Q_r \neq 2Q_s \pm 2p \quad (7)$$

$$Q_r \neq Q_s \pm \frac{Q_s}{2}; Q_r \neq \frac{Q_s}{2} \pm p, \quad (8)$$

missä  $p$  on napaparien lukumäärä.

Moottorin kolmivaiheinen käämitys tuottaa vain parittomia yliaaltoja. Roottorin jumitilassa vaikuttavien synkronisten vääntömomentin harmonisten rajoittamiseksi roottorin uraluvun tulisi toteuttaa yhtälö

$$Q_r \neq 6pg, \quad (9)$$

missä  $g$  on mikä tahansa positiivinen kokonaisluku. Tilanne, jossa roottori olisi jumissa, on kuitenkin käytännössä mahdoton, sillä moottoria ajetaan aina taajuusmuuttajalla, jolla syöttötaajuutta nostetaan aina asteittain ylöspäin. Kuitenkin roottorin pyöriessä jatkuvassa tilassaan syntyy haitallisia synkronisia vääntömomentteja, joiden välttämiseksi uraluvun tulee toteuttaa yhtälö

$$Q_r \neq 6pg \pm 2p. \quad (10)$$

Vääntömomentin harmonisten lisäksi roottorin mekaanisen värähtelyn välttämiseksi uralukumäärän tulee toteuttaa vielä seuraavat ehdot:

$$Q_r \neq 6pg \pm 1, \quad (11)$$

$$Q_r \neq 6pg \pm 2p \pm 1, \quad (12)$$

$$Q_r \neq 6pg \pm 2p \mp 1. \quad (13)$$

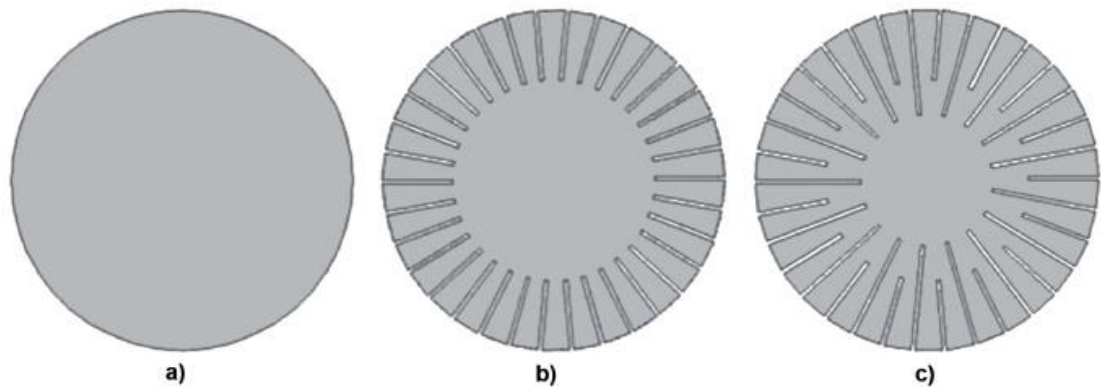


Yllä esitetyistä ehdoista (11 - 13) nähdään, että kaikki parittomat uraluvut saattavat aiheuttaa mekaanisia värähtelyitä. Tämä on selitettävissä epäsymmetrisellä magneettisella vetovoimalla, joka aiheutuu moottorin epäsymmetriasta roottorin uraluvun ollessa pariton samalla kun staattorin uraluku on parillinen. (Aho 2007: 93 - 94)

Optimaalista roottorin uritusta on tutkinut myös Jinning (1987) ja hänen tutkimustulostensa perusteella urien optimilukumäärä napaparille olisi 5 - 15 kappaletta. (Huppunen 2004: 47) Tämä on suhteellisen vähän verrattuna US Patenttiin 5,473,211 (1995), jossa väitetään, että roottorin uraluvun tulee olla suurempi kuin staattorin uraluvun. Patentti liittyy massiiviroottoriin suurnopeuskoneisiin.

### 3.2.4 Urien syvyys ja muoto

Roottorin uritus alentaa roottorin mekaanista kestävyyttä ja on merkittävin urien syvyyttä rajoittava tekijä. Toinen huomioitava tekijä on roottorimateriaalin saturoituminen urien välillä. Urien muodoksi on alalla tehdyissä tutkimuksissa aina valittu suorakaiteen muoto valmistusteknisistä syistä. Yleisin tapa roottorin urituksessa on tehdä jokaisesta urasta yhtä syvä, mutta muun muassa Aho ja Huppunen ovat tutkineet roottoria, jossa joka toinen ura oli syvempi. Massiiviroottorin radiaalinen poikkileikkaus on havainnollistettu kuvassa 9.



**Kuva 9.** Roottorin radiaalinen poikkileikkaus: a) sileä roottori, b) aksiaalisesti uritettu roottori saman syvyisillä urilla ja c) aksiaalisesti uritettu roottori, jossa joka toinen ura syvempi (Aho 2007: 84).

Roottorin uran syvyys vaikuttaa merkittävästi roottorin tuottaman vääntömomentin arvoon. Kuvan 9 b) uramallille, Huppunen toteaa väitöskirjassaan optimiurasyvyyden olevan noin 50 % roottorin säteestä, ja samaan prosentuaaliseen arvoon myös Aho (2007) päätyy väitöskirjassaan (Huppunen 2004: 123 & Aho 2007: 104). Molemmat yrittivät vähentää mekaanisia ja saturaatiosta aiheutuvia rajoitteita urittamalla joka toisen uran matalammaksi, kuvan 9 c) uramallin mukaisesti. Lopputuloksena molemmat päätyivät väitöskirjoissaan samaan tulokseen, jossa uramalli c) ei parantanut juurikaan vääntömomenttia (Huppunen 2004: 123 & Aho 2007: 91).

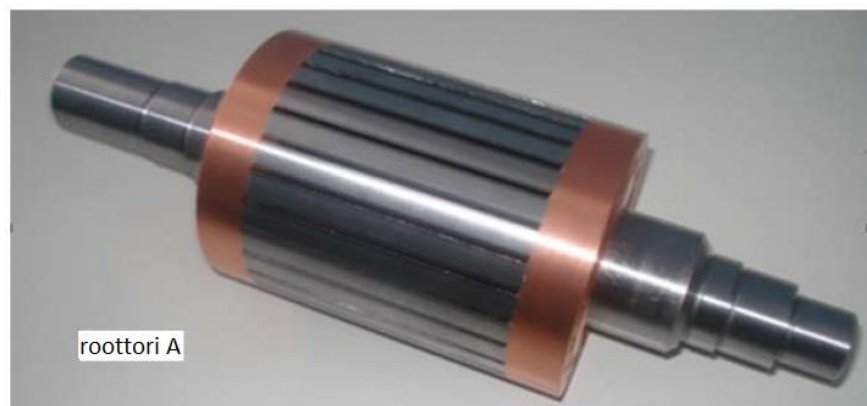
### 3.2.5 Urien leveys

Urien leveys vaikuttaa ilmavälissä vaikuttavaan vääntömomenttiin. Huppunen (2004) toteaa väitöskirjassaan, että optimikombinaatio uraleveyden ja uraluvun suhteen on mahdollista löytää tapauskohtaisesti. Hänen mukaansa roottori näyttää toimivan parhaiten mahdollisimman kapeilla uraleveyksillä, kuten 1 mm:llä, mutta jos esimerkiksi uraleveys kaksinkertaistuu 1 millimetristä 2 millimetriin ja samaan aikaan urien lukumäärä puolittuu, pysyy tuotettu ilmavälin momentti lähes samana.

Urien leveyttä valitessa tulee suunnittelussa huomioida myös valmistustekniset tekijät, jolloin roottorista saadaan kustannustehokas (Huppunen 2004: 120 - 121). Huomiota on otettava myös jo edellisessä kappaleessa mainittu roottorimateriaalin saturoituminen urien välillä.

### 3.2.6 Aksiaaliset, radiaaliset ja vinot urat

Useimmiten roottorin uritus on toteutettu vain aksiaalisesti, mutta myös radiaalinen uritus on ollut alalla tutkimuksen kohteena. Kuva 10 havainnollistaa roottorin aksiaalisia ja radiaalisia urituksia.



a)



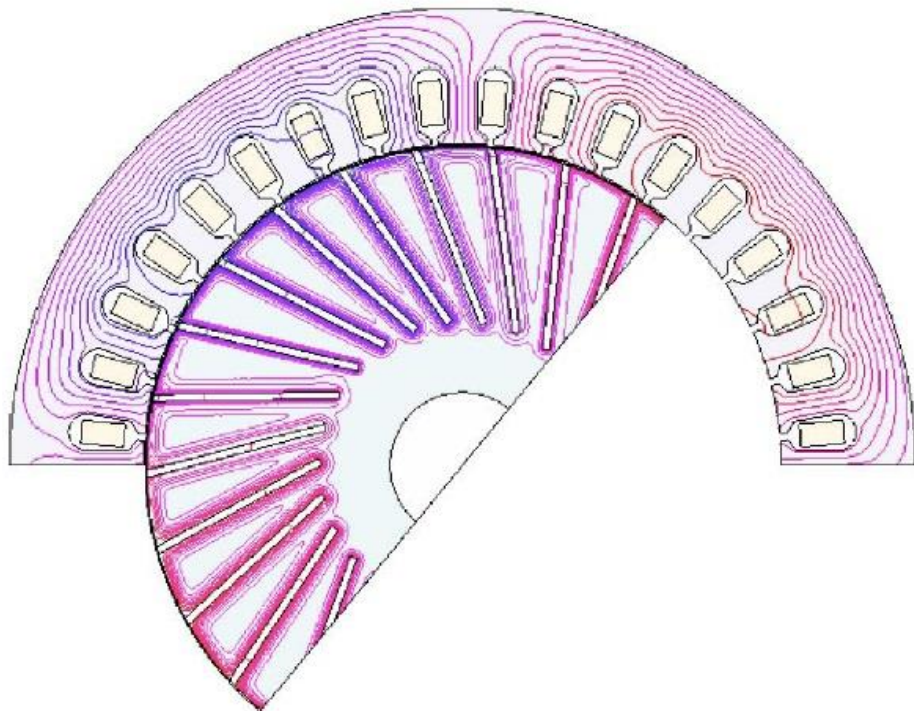
b)

**Kuva 10.** Roottorin uritus: a) aksiaalisesti uritettu roottori ja b) aksiaalisesti ja radiaalisesti uritettu roottori (Gessese, Binder & Funieru 2010: 1765).

Gessese ym. (2010) osoittaa raportissaan aksiaalisesti uritettuun roottoriin lisättyjen radiaalisten urien, kuvan 9 b) malli, vähentäneen pyörrevirtahäviöitä roottorin pinnassa. Tämä perustuu pyörrevirtojen teiden katkaisuun akselin suhteen poikittaisilla urilla. Tutkimustuloksissa häviöitä saatiin laskettua ja hyötysuhdetta parannettua, mutta tehokerroin aleni, koska roottorin ilmapäliä kasvatettiin samalla ja se kasvattaa magnetointivirtaa. Pyörrevirtahäviöiden lasku kuitenkin vaikutti merkittävästi roottorin lämpenemään, joka laski puoleen lyhyessä 10 minuutin testissä verrattuna roottoriin ilman radiaalisia uria. Korkea lämpötila alentaa laakereiden elinikää. (Gessese ym. 2010)

Myöhemmin väitöskirjassaan Gessese (2012) osoittaa radiaalisten urien lisäämisen aksiaalisesti uritettuun roottoriin vähentäneen pyörrevirtahäviöitä peräti 70 % nimellisellä pyörimisnopeudella pyörivässä roottorissa verrattuna vain aksiaalisesti uritettuun roottoriin. Radiaalisilla urilla ei ollut vaikutusta roottorin vääntömomenttiin. (Gessese 2012: 57 - 58)

Urien vinouden vaikutusta erityisesti vääntömomenttiin on tutkittu vähän. Ho, Niu & Fu (2010) osoittaa raportissaan miten asettamalla aksiaaliset urat säteeseen nähden  $15^\circ$  -  $60^\circ$  asteen kulmaan saatiin vääntömomenttia parannettua parhaimmassa tapauksessa 10,7 % verrattuna aksiaalisesti ja radiaalisesti suoraan roottoriin. Kuva 11 havainnollistaa urien vinoutta säteen suhteen.



**Kuva 11.** Magneettivuo radiaalisesti vinoon uritetussa induktiomotorissa (Ho ym. 2010: 1091).

Urien vinouttaminen lisää kuitenkin värinää vääntömomenttiin ja sen vähentämiseksi myös radiaalisia uria tulee vinouttaa. Urien vinouttamisen vaikutus vääntömomenttiin perustuu magneettivuon tunkeutuman pituuden kasvuun vinouskulman kasvaessa. Tutkimustuloksia ei voi kuitenkaan suoraan rinnastaa suurnopeusmoottoriin, koska raportissa esitetyn massiiviroottorin nimellispyörimisnopeus oli vain 1200 rpm. Mielenkiintoisia tutkimusvaihtoehtoja se kuitenkin antaa suurnopeuskoneen massiiviroottorin uritusta ajatellen. (Ho ym. 2010)

### 3.2.7 Roottorin päällystäminen

Tässä työssä keskitytään parantamaan päällystämätöntä roottoria optimoimalla roottorin pinnan uritus. Päällystettyä roottoria käytetään kuitenkin usein suurnopeustekniikan sovelluksissa, jonka takia sen etuja esitellään seuraavaksi.

Roottorin pinnan yliaaltojen vähentäminen onnistuu myös päällystämällä uritettu roottori sopivalla pintamateriaalilla. Päällystys vähentää kaasu-, kitka- ja pyörrevirtahäviöitä, kun samalla roottorin mekaaninen kestävyys paranee. Häviöt vähenevät, koska pintamateriaali suodattaa korkeita taajuuksia ilmavälin magneettivuosta. Materiaaliksi voidaan valita joko sähköisesti hyvin johtava ja alhaisen permeabiliteetin omaava materiaali tai korkean resistiivisyyden ja permeabiliteetin omaava materiaali, joista ensimmäinen vaihtoehto on toimivampi. Jos materiaaliksi valitaan korkean resistiivisyyden materiaali, häviöitä aiheutuu myös roottorin ytimessä. Sähköisesti hyvin johtava materiaali on esimerkiksi kupari, joka on käytetyin päällysmateriaali. Kuvassa 12 on eräs kuparipäällysteinen roottori.



**Kuva 12.** Kuparipäällystetty roottori (Gieras & Saari 2010).

Roottorin päällystäminen kuparilla on valmistusteknillisesti vaikeaa ja kallista sekä se ei sovellu kaikkiin sovelluksiin. Aho (2007) ehdottaa väitöskirjassaan vaihtoehtoiseksi päällysmateriaaliksi korkean resistiivisyyden ja permeabiliteetin omaavaa ferro-

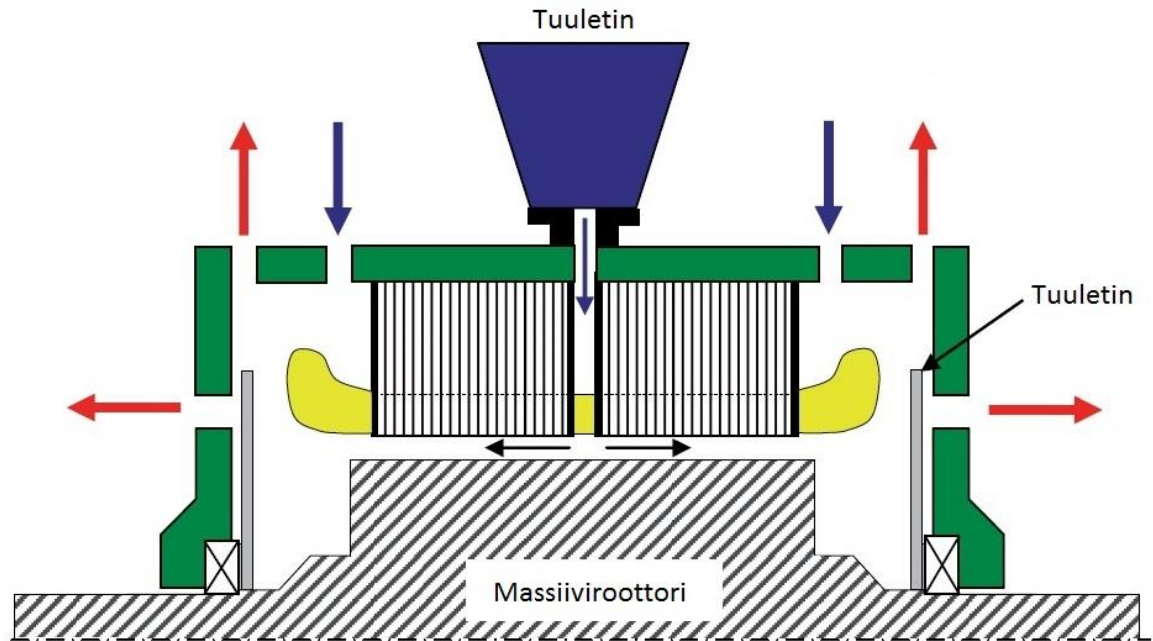
magneettista terästä. Materiaalin kiinnitys tapahtuisi hitsaamalla, joka lisäisi uritetun roottorin jäykkyyttä ja parantaisi siten sen mekaanista kestävyyttä. Materiaali heikentää ilmvälin yliaaltoja ennen kuin ne tunkeutuvat roottorin ytimeen, jolloin pyörrevirtahäviöt vähenevät. Materiaalin resistiivisyyden tulee olla roottorin ytimen materiaalin resistiivisyyttä korkeampi.

Päällystämällä uritettu roottori menetetään kuitenkin osa urituksen tuomista vaikutuksista. Ahon laskennallisissa testauksissa roottorin häviöt laskivat 15 % ja moottorin hyötysuhde parani 1 % päällystämisen ansiosta, mutta jättämästä riippuvat häviöt kuitenkin kasvoivat päällystämisen myötä. Aho korostaakin materiaalin valinnan ja paksuuden määrittämisen tarkkaa suunnittelua, joka on aina tapauskohtaista. Liian paksu kerros aiheuttaa korkeamman jättämän moottoriin, koska korkean resistiivisyyden materiaalin tuottama vääntömomentti jää alhaisemmaksi kuin päällystämättömässä tapauksessa. Kerroksen ollessa taas liian ohut, yliaallot eivät vaimene riittävästi ennen roottorin ydintä. Päällystäminen kasvattaa myös roottorin impedanssia, joka alentaa moottorin tehokerrointa. Huomioitavaa on myös roottorin jäähdytyspinta-alan merkittävä pienentyminen päällystämisen jälkeen, joka tulee ottaa suunnittelussa huomioon. (Aho 2007: 106 - 115)

### 3.3 Suurnopeuskoneen jäähdytys

Suurnopeuskoneiden suuri tehotiheys ja muuttuvat toiminta olosuhteet vaativat moottoriin tehokkaan aktiivisen jäähdytyksen, jotta staattorikäämin ja roottorin sallitut lämpötilat eivät ylitä. Moottorin häviöt muuttuvat pyörimisnopeuden mukaan ja suurella pyörimisnopeudella merkittävimmät häviöt aiheutuvat kaasus- ja kitkahäviöistä sähköisten häviöiden ollessa minimaaliset. Sähköiset häviöt tulee kuitenkin huomioida kokonaisuuteen, koska myös ne vaikuttavat staattorin ja roottorin lämpötiloihin, jotka ovat kriittisiä moottorin toiminnalle. Tämän tyyppiselle häviöjakaumalle avoimen piirin jäähdytys on suositeltavin vaihtoehto. (Saari 1998: 31, 33) Tämä perustuu kaasus- ja kitkahäviöiden ilmvälin lämmittävään vaikutukseen, jonka myötä kuuma ilma tulee imeä ilmvälistä pois, jotta se ei lämmittäisi staattoria ja roottoria. Näin ollen suljettu jäähdytysvaihtoehto TEFC (Totally Enclosed Fan Cooled) ei ole toimiva (Lähteenmäki 2002: 25). Kuva 13 havainnollistaa pakotettua avoimen piirin jäähdytystä.





**Kuva 13.** Pakotettu avoimen piirin jäähdytys, aksiaalinen poikkileikkaus massiiviroottorin puolikkaasta (Aho 2007: 28).

Pakotetun avoimen piirin jäähdytyksessä jäähdyttävä ilma työnnetään staattorin jäähdytysaukosta ilmapäliin, jossa akselin päässä olevat tuulettimet ohjaavat ilmavirran ulos moottorin rungosta. Staattorissa on yksi tai useampi jäähdytyskanava, joka jakaa staattorin useampaan jäähdytysalueeseen parantaen sen jäähdytystä. (Aho 2007: 28 - 29)

Jäähdytyksen toimivuus perustuu staattiseen paine-eroon moottorin tulo- ja poistovirtauksen välillä, joka aikaansaadaan tuulettimilla (Saari 1998: 33). Kaksi tuuletinta asennetaan akselin toiseen päähän, ja tuulettimet voivat, joko puhaltaa tai imeä ilmaa moottorin läpi. Lämpötilannousun kannalta parempi vaihtoehto on imeä tuulettimilla ilmaa moottorin läpi, jolloin paine-erosta aiheutuvat häviöt eivät aiheuta lämpöä moottoriin. (Lähtenmäki 2002: 25)

### 3.4 Suurnopeuskoneen laakerit

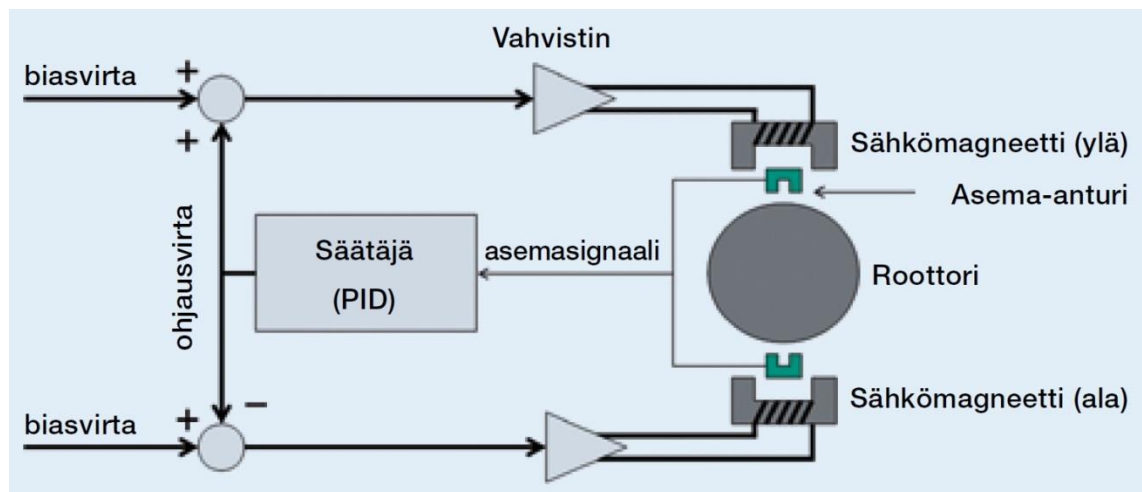
Sähkökoneen toimintakyky ja käytettävyys riippuvat laakereiden häiriöttömästä toimivuudesta, mihin toimintalämpötila vaikuttaa merkittävästi. Kitkahäviöiden lisäksi laakeripesän ja akselin lämpötilat vaikuttavat laakereiden lämpötilaan. (Saari 2012: 63) Useimpien laakereiden maksimi lämpötilankesto on 120 °C, joten toimintalämpötilan on usein pysyttävä tämän alapuolella. (Saari 2012: 70)

Suurnopeuskoneissa käytetään usein öljyttömiä kaasui- tai magneettilaakereita tai kiertoainevoideltuja mekaanisia laakereita. Suomessa ensimmäisissä suurnopeuskoneissa käytettiin kaasulaakereita, mutta niiden suunnittelu ja valmistus oli vaikeaa, mikrometrin luokaa olevien toleranssirajojen myötä. (Larjola ym. 2010: 7, 30) Paras vaihtoehto on käyttää magneettilaakereita, joiden avulla roottori ja staattori eivät ole kosketuk-

sisä. Näin ollen laakerit eivät vaadi voitelua ja hankaavia osia ei ole, jolloin häviöitä ei aiheudu. Samalla moottorin huoltokulut laskevat ja elinikä pitenee.

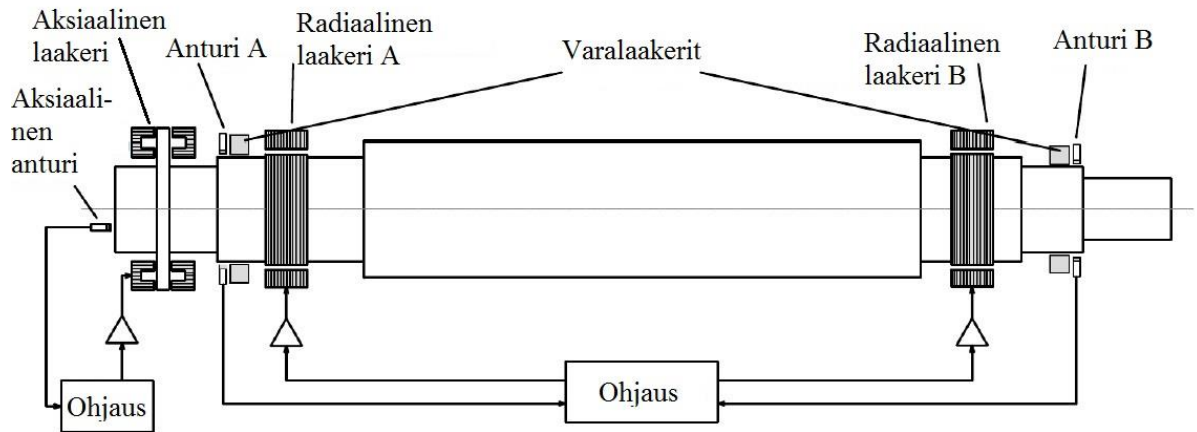
Magneettilaakerien toiminta voidaan toteuttaa passiivisesti, käyttämällä kestopagneetteja tai aktiivisesti mittaamalla asema-antureilla roottorin asemaa ja ohjaamalla aktiivisesti sähkömagneetteja. Aktiivinen magneettilaakeri on huomattavasti käytetympi, johtuen muun muassa passiivisen magneettilaakerin heikosta vaimennuskyvystä. (Larjola ym. 2010: 102)

Aktiivisten magneettilaakereiden toimintaperiaate perustuu elektromagneettiseen levitaatioon. Sähköiseen magneettiin syötetty virta kohdistaa magneettisen vetovoiman ferromagneettiseen aineeseen, joka jää stabiiliin levitaatiotilaan kun vastakkaisella puolella oleva toinen sähköinen magneetti kohdistaa kappaleeseen yhtä suuren vastakkais-suuntaisen voiman. Syöttövirtaa ohjaamalla vaikutetaan magneettien vetovoimaan ja siten kappaleen stabiilisuuteen. Aktiivisten magneettilaakereiden toimintaperiaate on havainnollistettu kuvassa 14. (Hynynen 2011: 20 - 21)



**Kuva 14.** Aktiivisten magneettilaakerin toimintaperiaate (Larjola ym. 2010: 103).

Tyypillisessä aktiivisia magneettilaakereita käyttävässä järjestelmässä roottori on laminoitu korkeamman magneettisen permeabiliteetin omaavalla sähköisellä teräksellä, joka vähentää pyörrevirtahäviöitä. Järjestelmässä on kaksi radiaalista laakeriparia, yksi aksiaalinen laakeripari ja turvallisuuden takaamiseksi roottorin molemmissa päissä on varalaakerit, jotka pitävät roottorin paikallaan virran ollessa katkaistuna ja alasajo tilanteissa. Magneettilaakereiden rakenne roottorissa on esitetty kuvassa 15.



**Kuva 15.** Aktiivisten magneettilaakereiden rakenne roottorissa (Hynynen 2011: 22).

Laakereiden lisäksi järjestelmässä on ohjausyksiköitä, jotka toimivat asentoantureista saatavien tietojen perusteella. Kaupallisissa tuotteissa käytetään yleisesti PID-säädintä (Proportional-Integral-Derivative), niiden yksinkertaisen rakenteen vuoksi, mutta niiden suorituskyky on rajallinen. Käytettäessä kehittyneempiä säätimiä ohjaus mahdollistaa optimaalisemman laitteen suorituskyvyn, mutta samalla kustannukset kasvavat. Korkeat investointikulut ovatkin olleet suurin aktiivisten magneettilaakereiden käyttöönottoa rajoittava tekijä. (Hynynen 2011: 18 - 19, 21 - 22, 31)

### 3.5 Taajuusmuuttajakäyttö suurnopeuskoneissa

Taajuusmuuttajakäyttö asettaa uusia vaatimuksia moottorin suunnittelulle. Esimerkiksi pyörrevirtahäviöt kasvavat merkittävästi taajuuden kasvaessa ja syötetyn jännitteen ja virran aaltomuodot eivät ole täysin sinimuotoisia ja siten aiheuttavat lisää häviöitä moottorissa. (Lähtenmäki 2002: 12)

Lähtenmäki (2002) tutki väitöskirjassaan miten jännitemodulaatio vaikuttaa tehohäviöihin suurnopeusmoottorissa ja taajuusmuuttajassa. Hän vertaili kahta pulssimodulaatiota keskenään, leveyden PWM (Pulse Width Modulation) ja amplitudin PAM (Pulse Amplitude Modulation) säätöä. Lämpötilan nousun toimiessa mittarina voitiin PAM säätöä käytettäessä syöttää 8 % enemmän tehoa moottoriin PWM säätöön verrattuna. Myös tarkasteltaessa moottorin ja taajuusmuuttajan kokonaishäviöitä toimii PAM paremmin kuin PWM aaltomuotoinen säätötekniikka, jolla häviöitä syntyi 4 % enemmän. Tämä perustuu taajuusmuuttajan häviöiden kasvuun kytkentätaajuuksien funktiona. PWM säädöllä kytkentätaajuus on korkeampi kuin PAM säädöllä, jonka myötä menetetään PWM säädön etuna oleva parempi jännitteen aaltomuoto kasvavien kokonaishäviöiden myötä. Näin ollen Lähtenmäki tulee väitöskirjassaan tutkimustulosten perusteella siihen tulokseen, että jännitteelle tulisi suosia PAM aaltomuotoa suurnopeusinduktiokoneissa.

Mahdollista on myös yrittää optimoida pulssin aaltomuotoa parantamalla PWM invertterin suorituskykyä tai lisäämällä LC-suodatin invertterin ja moottorin väliin alen-



tamaan moottorin häviöitä. Suodatin voi myös kompensoida osan moottorin reaktiivisesta kuormasta pienentäen näin myös invertterin kokotarvetta ja näin ollen sitä voidaan suositella käytettäväksi myös PAM säädössä. (Lähtenmäki 2002: 66, 67, 70, 74, 79) Lähtenmäki (2002) osoittaa väitöskirjassaan, että kytkentätaajuuden ja taajuusohjeen suhde ( $f_{sw}/f_s$ ) tulee olla vähintään 21, jotta tuotetaan riittävän laadukas virran käyrämuoto moottorille. (Huppunen 2004: 15)

## 4 SÄHKÖMOOTTORIN TEHO, HYÖTYSUHDE JA HÄVIÖT

Sähkömoottorin hyötysuhde kuvaa moottorin kykyä muuttaa sähköenergia mekaaniseksi energiaksi. Moottorin häviöt määrittävät hyötysuhteen ja tarvittavan jäähdytyksen, jotta moottorin lämpötila saadaan pidettyä ylärajan alapuolella. Tehohäviöt voidaan jakaa sähköisiin ja mekaanisiin häviöihin. (Huppunen 2004: 62)

Moottorin mekaaninen ulostuloteho  $P_{mech}$  tietyllä nopeudella, voidaan määrittää sähkömagneettisen vääntömomentin  $T_{em}$  ja roottorin kehänopeuden  $u_r$  tulona seuraavasti

$$P_{mech} = T_{em} u_r = T_{em} \left( (1 - s) \frac{\omega_s}{p} \right) = T_{em} \left( (1 - s) \frac{2\pi f}{p} \right), \quad (14)$$

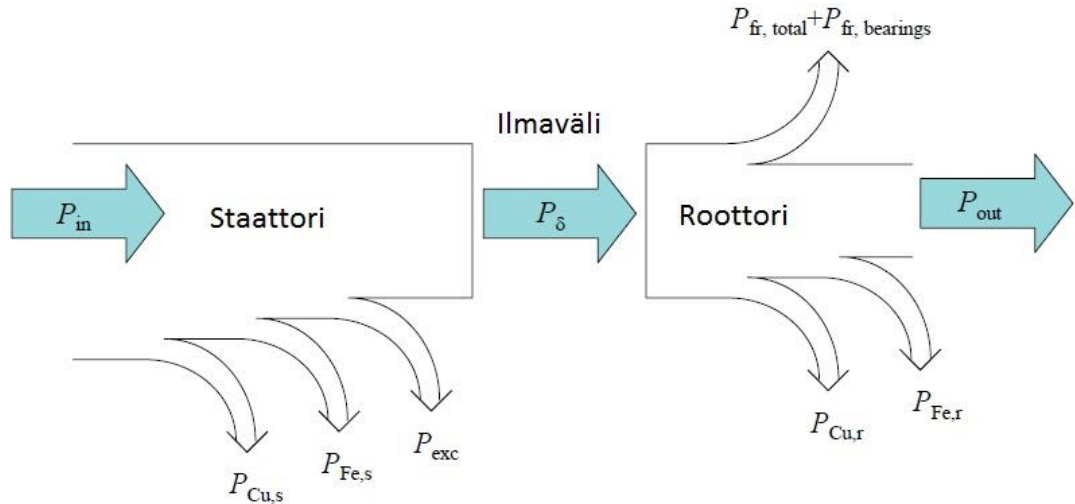
missä  $s$  on jättämä,  $p$  on napaparien lukumäärä,  $\omega_s$  on staattorin synnyttämän magneettikentän kulmanopeus ja  $f$  on staattoriin syötetty taajuus. (Aho 2007: 26) Sähkömoottorin hyötysuhde  $\eta$  lausutaan mekaanisen ulostulotehon  $P_{out}$  ja sähköisen sisäänmenotehon  $P_{in}$  osamääränä

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100\% . \quad (15)$$

Moottorissa kuluva häviöteho  $P_{loss}$  on sisään menevän sähköisen tehon  $P_{in}$  ja ulostulevan mekaanisen tehon  $P_{out}$  erotus

$$P_{loss} = P_{in} - P_{out} . \quad (16)$$

Kuva 16 havainnollistaa miten häviöt eritellään sähkömoottorissa.



**Kuva 16.** Sisään menevän sähkötehon  $P_{in}$  jakautuminen staattorin kuparihäviöihin  $P_{Cu,s}$ , rautahäviöihin  $P_{Fe,s}$  ja hajahäviöihin  $P_{exc}$ . Ilmavälitehon  $P_{\delta}$  jakautuminen roottorin kuparihäviöihin  $P_{Cu,r}$  ja rautahäviöihin  $P_{Fe,r}$ , kitka- ja kaasuvirtaushäviöihin  $P_{fr,total}$  sekä laakerihäviöihin  $P_{fr,bearings}$ . Ulostuloteho  $P_{out}$  on akseliteho. (Aho 2007: 24)

Sähkömoottorin sisään menevästä sähkötehosta  $P_{in}$  staattori kuluttaa osan staattorin kuparihäviöihin  $P_{Cu,s}$  ja rautahäviöihin  $P_{Fe,s}$  sekä hajahäviöihin  $P_{exc}$ . Jäljelle jää ilmaväliteho  $P_{\delta}$ , josta osa kuluu vielä roottorissa kuparihäviöihin  $P_{Cu,r}$  ja rautahäviöihin  $P_{Fe,r}$  sekä kitka-, kaasuvirtaus- ja laakerihäviöihin  $P_{fr}$ . Jäljelle jäävä ulostuloteho  $P_{out}$  on akseliteho. (Aho 2007: 24) Seuraavissa luvuissa 4.1 ja 4.2 käsitellään erikseen staattorin ja roottorin häviöitä.

## 4.1 Staattorin häviöt

Tässä työssä ei keskitytä staattorin häviöihin, mutta koska staattorin häviöt vaikuttavat ilmavälitehoon ja se taas roottorin toimintaan, esitellään staattorissa tapahtuvat häviöt lyhyesti. Staattorin kokonaishäviöt  $P_{s,loss}$  muodostuvat kuparihäviöiden  $P_{Cu,s}$ , rautahäviöiden  $P_{Fe,s}$  ja hajahäviöiden  $P_{exc}$  summasta

$$P_{s,loss} = P_{Cu,s} + P_{Fe,s} + P_{exc} . \quad (17)$$

Kun staattorin kokonaishäviöt ovat tiedossa, voidaan ilmavälinteho  $P_{\delta}$  laskea ottotehon  $P_{in}$  ja staattorin kokonaishäviöiden erotuksesta (Aho 2007: 25)

$$P_{\delta} = P_{in} - P_{s,loss} . \quad (18)$$

Hupponen (2004) toteaa väitöskirjassaan, että pyörrevirtahäviöitä voidaan vähentää valitsemalla staattorin laminointiin mahdollisimman ohuet rautalevyt. Korkeat staattori-

vuon tiheyden arvot tuottavat korkeat ilmapölyvuon tiheyden arvot, jotka ovat edellytyksenä korkean suorituskyvyn massiiviroottorikoneille. Näin ollen laminointimateriaalin laatuun on hyvä kiinnittää huomiota. (Huppunen 2004: 94, 96)

## 4.2 Roottorin häviöt

Roottorin kokonaishäviöt  $P_{r,loss}$  muodostuvat vääntömomentin tuottamiseen liittyvien häviöiden  $P_{fund,r}$ , pyörrevirtahäviöiden  $P_{surf,r}$  ja hystereesihäviöiden  $P_{hyst,r}$  summasta sekä lisätyistä mekaanisista häviöistä  $P_{fr,total}$

$$P_{r,loss} = P_{fund,r} + P_{surf,r} + P_{hyst,r} + P_{fr,total} . \quad (19)$$

Sähköisiin häviöihin kuuluvat vääntömomentin häviöt, pyörrevirtahäviöt ja hystereesihäviöt. Kuparihäviöt sisältyvät pyörrevirtahäviöihin ja rautahäviöt sisältyvät hystereesihäviöihin. Mekaaniset häviöt aiheutuvat kaas- ja kitkahäviöistä.

Massiiviroottorisen moottorin yliaaltohäviöt ovat tyypillisesti 10 %:in luokkaa roottorin kokonaishäviöistä, mutta jos roottorin suunnittelua ei ole tehty oikein, voi yliaaltohäviöiden osuus nousta jopa 50 %:iin roottorin kokonaishäviöistä. (Huppunen 2004: 62 - 63) Seuraavissa luvuissa esitellään roottorin sähköisiä ja mekaanisia häviöitä tarkemmin.

### 4.2.1 Sähköiset häviöt

Roottorin materiaalista johtuvat vääntömomentin tuottamiseen liittyvät häviöt ja roottorin pinnan pyörrevirtahäviöt voidaan yhdistää Joule häviöiksi, jotka ovat sähköisistä häviöistä merkittävimpiä. Joulehäviöt  $P_{J,r}$  voidaan arvioida koko roottorin tilavuudessa  $V$  seuraavasti

$$P_{J,r} = \iiint_V \rho_r J^2 dV , \quad (20)$$

missä  $\rho_r$  on materiaalin resistiivisyys ja  $J$  virrantiheys. Yleisesti massiiviroottorin sähköiset häviöt ovat läheisesti yhteydessä roottorin jättämään ja vääntömomenttihäviöt  $P_{fund,r}$  voidaan laskea jättämän  $s$  ja ilmapölytehon  $P_\delta$  tulona

$$P_{fund,r} = P_\delta \cdot s . \quad (21)$$

Roottorin hystereesihäviöt ovat vähäiset ja ne voidaan tässä työssä sivuuttaa merkityksettöminä. Laminoimattoman massiiviroottorin pyörrevirtahäviöt saadaan roottorin kokonaishäviöiden ja vääntömomenttihäviöiden erotuksesta (Aho 2007: 24 - 26)

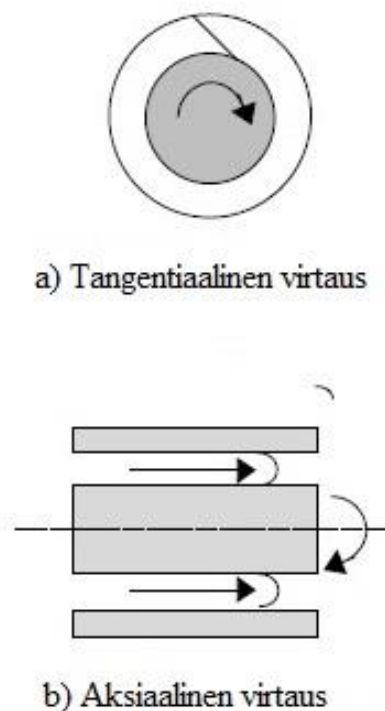
$$P_{surf,r} = P_{r,loss} - P_{fund,r} . \quad (22)$$

Pyörrevirtahäviöt ovat verrannollisia taajuuden neliöön. Ne voivat muodostaa jopa 40 % kokonaishäviöistä ja siten ne ovatkin merkittäviä suurnopeuskoneissa. Pyörrevirtahäviöitä aiheuttaa ilmapälissä oleva magneettivuoto, joka sisältää yliaaltokomponentteja. (Gessese 2012: 50, 55) Yliaaltokomponentteja aiheuttavat staattorin käämintä, staattorin urien avautumat ja syöttövirran pulssimodulaatiosta syntyvät yliaallot. Oikeanlaisella kääminnällä ja esimerkiksi ilmapälän pituuden kasvattamisella voidaan vähentää ilmapälän yliaaltokomponentteja. (Aho 2007: 105)

#### 4.2.2 Mekaaniset häviöt

Mekaanisia häviöitä aiheutuu ilmapälissä ja niitä kutsutaan kaas- ja kitkahäviöiksi, ja niiden osuus suurnopeuskoneen häviöistä on erittäin merkittävä. Yleisesti suurnopeuskoneen suunnittelussa tuleekin kiinnittää erityistä huomiota roottoriin, koska siinä aiheutuvat häviöt vaikuttavat koneen lämpötilan nousuun ja hyötysuhteeseen. (Gessese 2013: 61)

Suurnopeusroottori muodostuu sylinteripinnasta, jota ympäröi sähkökoneen staattori. Suurnopeuskoneet omaavat suuren tehokkuuden ja vaativat siten tehokkaan aktiivisen jäähdytyksen. Yleinen jäähdytyskeino on ilmavirran johtaminen staattorin ja roottorin ilmapälän läpi. Tästä aiheutuu roottorin pinnan ja ilmavirran välille kitkavoimia ja lisäksi suurella nopeudella pyörivä roottori kiihdyttää ilmavirtauksen tangentialiseen liikkeeseen. Kuva 17 havainnollistaa ilmapälän tangentialista ja aksiaalista ilmavirtausta.



**Kuva 17.** Ilmapälän tangentialinen ja aksiaalinen ilmavirtaus (Saari 1998: 11).

Ilmavälin kitkahäviöt ovat suoraan verrannollisia pyörimisnopeuden kuutioon ja kaasuhäviöt ovat suoraan verrannollinen pyörimisnopeuden neliöön. Näin ollen suurnopeuskoneissa nämä aiheuttavat merkittävimmät häviöt. Kitkahäviöitä syntyy roottorin sylinteripinnan lisäksi myös roottorin päädyissä perustuen pyörivän kiekon kitkaan (Saari 2012: 36).

Pyörivän sylinterin kaasukitkahäviö  $P_{fr,r}$  riippuu roottorin mitoista ja pyörimisnopeudesta seuraavasti

$$P_{fr,r} = k_f C_T \rho_{air} \pi \omega_r^3 r_r^4 l_r, \quad (23)$$

missä  $\rho_{air}$  on ilmavälin kaasun tiheys,  $r_r$  roottorin säde,  $L_r$  uritetun roottoriosan aksiaalinen pituus ja  $\omega_r$  roottorin pyörimisnopeus. Kertoimista  $k_f$  riippuu roottorin pinnasta ( $k_1 = 1$  sileälle pinnalle ja  $k_2 = 2,5$  aksiaalisesti uritetulle pinnalle) ja  $C_T$  on vääntömomentti kerroin. (Aho 2007: 27) Se lasketaan seuraavasti

$$C_T = \frac{0,0152}{Re_\delta^{0,24}} \left[ 1 + \left( \frac{8}{7} \right)^2 \left( \frac{4Re_\alpha}{Re_\delta} \right)^2 \right]^{0,38}. \quad (24)$$

Yhtälössä (24)  $Re_\alpha$  on aksiaalisen virtauksen Reynoldsin luku ja  $Re_\delta$  on tangentialisen virtauksen Reynoldsin luku. Reynoldsin luku luonnehtii virtauksen ominaisuuksia ja määrittää virtaustyyppiä joko laminaarisen tai turbulenttisen. Ilmavirtauksen tyyppi on riippuvainen väliaineen tiheydestä, viskositeetista, karakteristisesta mitasta sekä virtausnopeudesta. (Saari 2012: 36 - 38) Roottorin pakottaman jäähdytysilman tangentialiseen liikkeen aiheuttama massavirtariippuva tehohäviö lasketaan seuraavasti

$$P_{f,a} = k_2 q_m u_r^2, \quad (25)$$

missä  $k_2$  on nopeuskerroin,  $q_m$  on jäähdyttävän kaasun massanopeus ja  $u_r$  on roottorin kehänopeus. (Saari 2012: 39)

Kiekkovirtausyhtälöstä saadaan roottorin päätyjen aiheuttamat häviöt

$$P_{fr,end} = \frac{1}{2} C_f \rho_{air} \omega^3 (r_{ulko}^5 - r_{sisä}^5), \quad (26)$$

missä  $r_{ulko}$  ja  $r_{sisä}$  ovat roottorin päätykiekon ulko- ja sisäsäde (Aho 2007: 27).  $C_f$  on päätyjen kitkakerroin, joka lasketaan seuraavasti

$$C_f = \frac{0,268}{Re_r^{0,246}} \left( \frac{s_v}{r_{ulko}} \right)^{0,0655}. \quad (27)$$

Yhtälö (27) perustuu kokeelliseen tutkimukseen pyörivän koteloidun kiekon kitkasta eri väläyksen  $s_v$  arvoilla. (Saari 2012: 38)

Kokonaiskaasukitkahäviöt  $P_{\text{fr,total}}$  saadaan edellä esiteltyjen häviökomponenttien summana

$$P_{\text{fr,total}} = P_{\text{fr,r}} + P_{\text{f,a}} + 2P_{\text{fr,end}} . \quad (28)$$

Kaasu- ja kitkahäviöiden aiheuttama tehon alenema vähentää moottorin akselitehoa ja siten suurnopeuskoneilla sileäpintainen roottori on käytetympi kuin uritettu ilman päällystystä oleva roottori. (Aho 2007: 27)

## 5 URITUKSEN SUUNNITELU

Tämän työn tavoitteena oli löytää optimaalinen uritus massiiviroottorille. Lähtötietoina roottorin suunnitteluun saatiin suurnopeusmoottorin staattorille ja roottorille perustiedot mitoista ja materiaaleista. Tiedot on esitetty taulukossa 1.

*Taulukko 1. Staattorin ja roottorin lähtötiedot (Känsäkangas 2012: 72).*

Staattori		Roottori	
Ulkohalkaisija	150 mm	Halkaisija	70 mm
Sisähalkaisija	74 mm	Akselin halkaisija	12 mm
Pituus	140 mm	Pituus	140 mm
Urien määrä	24	Oikosulkurenkkaan pituus	30 mm
Materiaali	Sura No 25	Materiaali	Teräs

Optimaalisen urituksen löytämiseksi luotiin ensin laskentaohjelmaa varten roottorimalli, koska valmiista roottorimalleista mikään ei soveltunut käytettäväksi. Staattorille käytettiin valmista EGR moottorin staattorimallia, joka on esitelty luvussa 5.2. Tämän jälkeen tehtiin simuloinnit laskentaohjelmalla ja hyödynnettiin optimointityökalua. Luvussa 5.1 esitellään käytetyt laskentaohjelmat, jonka alikappaleissa käsitellään roottorimallin luomista ja optimointityökalun käyttöä. Luvussa 5.2 esitellään Adept ohjelmassa käytetyt staattorin ja roottorin parametrit.

### 5.1 Laskentaohjelmat

Laskentaohjelmana toimi sähkökoneiden suunnitteluun kehitetty ABB:n Adept-ohjelma, ja sen ratkaisija- ja aliohjelmat. Adept-ohjelma toimii käyttäjärajapintana ja sen laskentaohjelmat käyttävät joko analyttisiin kaavoihin tai elementtimenetelmään perustuvia menetelmiä. Analyttiset menetelmät perustuvat sähkömagneetiikan perusyhtälöihin ja laskentatarkkuus perustuu usein testitulosten määrittämiin korjauskertoimiin. Elementtimenetelmässä laskenta-alue jaetaan osiin, elementteihin, joissa jokaisessa muodostetaan paikallinen yhtälö. Yksittäisten elementtien yhtälöt riippuvat viereisistä elementeistä, joten kaikkien elementtien yhtälöt on ratkaistava samanaikaisesti. Tästä muodostuu suuri yhtälöryhmä, jonka ratkaisuna saadaan elementtiyhtälöiden tuntemattomien arvot kaikissa elementeissä.

Analyttiseen menetelmään perustuvien laskentaohjelmien etuna on merkittävästi nopeampi laskentanopeus (kymmeniä millisekunteja) verrattuna elementtimenetelmään perustuviin ohjelmiin. Niiden heikkoutena on kuitenkin soveltumattomuus täysin uusien moottorimallien tutkimiseen, koska menetelmän tarkkuus perustuu koestuksien avulla



viritettyihin korjauskertoiimiin. Elementtimenetelmään perustuvat ohjelmat ovat tarkempia ja niiden etuna on mahdollisuus tarvittaessa suurentaa tarkkuutta tihentämällä elementtiverkkoja halutuista kohdista.

Eräs analyytisiin menetelmiin perustuva Adeptin aliohjelma on S113 ja elementtimenetelmään perustuva aliohjelma on FCSmek. Tässä työssä käytetään FCSmek-ohjelmistoa, joka on kehitetty Aalto Yliopiston sähkömekaniikan laboratoriossa. Ohjelmisto koostuu monesta itsenäisestä ohjelmasta, joista muun muassa yksi luo elementtiverkon tutkittavalle sähkökoneelle ja toinen ratkaisee toimintapisteille tärkeimpiä suoritusarvoja. Elementtiverkon luomiseen ohjelma tarvitsee lähtötietoina tutkittavan kohteen, tässä tapauksessa massiiviroottorin, mallin ja siihen käytetyt materiaalit. Seuraavassa kappaleessa kerrotaan miten malli toteutettiin Lua-koodilla. (Ryypö 2005: 10 - 11)

### 5.1.1 Roottorimallin luominen Lua-koodilla

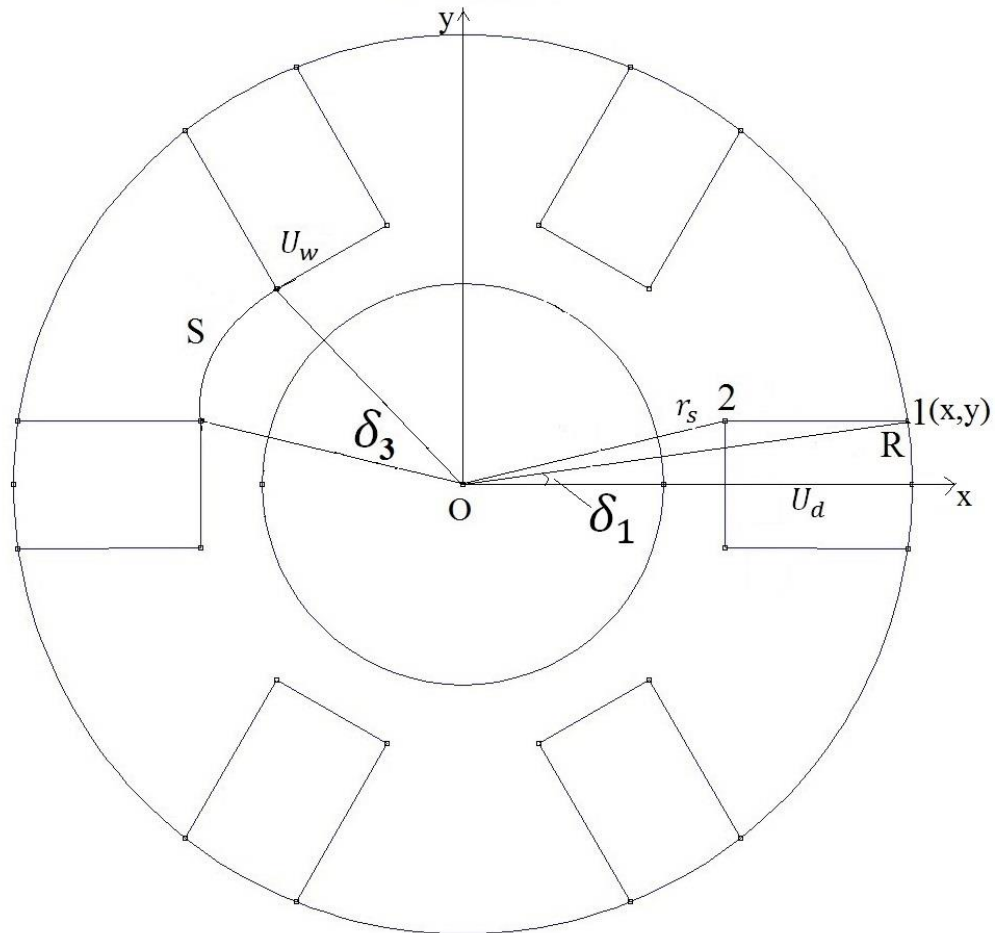
Adeptin FCSmek aliohjelmaa FEMM varten luodaan Lua-koodilla roottorimalli, liite 1. Lua-koodi on tarkoitettu käytettäväksi kevyenä konfiguraatiokielenä, sitä ei käännetä vaan tulkitaan suorituksen aikana. Lua-koodissa ei ole pää ohjelmaa vaan se toimii ai-noastaan sulautettuna toiseen ohjelmaan, tässä tapauksessa FEMMiin. (Celes 2000: 1) FEMM muodostaa Lua-koodista geometrisen mallin ja jakaa sen elementteihin, jonka jälkeen useat eri ratkaisijaohjelmat ratkaisevat elementtien osittaisdifferentiaaliyhtälöitä (Meeker 2010: 6).

Koodin pohjaksi valittiin valmiista roottorimalleista sopivin, jota lähdettiin muok-kaamaan tarpeeseen sopivaksi. Ensin muutettiin akselin ja roottorin materiaalit teräksiksi ja poistettiin koodista tarpeettomat komennot. Tämän jälkeen lähdettiin suunnittelemaan urien piirtämistä. Aluksi oli matemaattisesti hahmotettava miten suorakaiteen mallisten urien kulmapisteet sijoittuvat ulkokehälle ja määrätyle syvyydelle roottorin sisällä, sisäkehälle. Tämän jälkeen ratkaistiin matemaattisesti yhden uran ulko- ja sisä-kehän kulmapisteiden koordinaatit, jonka jälkeen luotiin koodi, joka sijoittaa muidenkin urien kulmapisteet tasaisesti oikeisiin kohtiin roottorin ulko- ja sisäkehää. Ulkokehän pisteiden määrittäminen oli huomattavasti helpompaa kuin sisäkehän, sillä mahdollisuus asettaa ura vinoon monimutkaisti sisäkehän pisteiden koordinaattien määrittämistä.

Kuvaan 18 on havainnollistettu FEMM-ohjelmalla piirrettyä roottorimallia, jossa urat ovat yhdensuuntaisia roottorin säteen kanssa. Roottorimallissa on nyt vain 6 kappaletta uria, jotka ovat 10 mm leveitä, jotta geometrinen ratkaisu on selkeämmin näytettävissä kuvasta. Todellisuudessa roottorissa käytetään 2 – 4 mm leveitä uria. Kuvassa 18 oikealla olevan uran kulmapisteet 1 ja 2 saadaan ratkaistua geometrinen yhtälöiden avulla. Piste 1 etäisyys origosta  $O$  on uritetun roottorin säteen  $R$  pituinen ja sen rajaaman segmentin kaariosan pituus on puolet uran leveydestä  $U_w$ . Hyödynnetään segmenttikulman  $\delta$  yhtälöä, jossa yksikkönä on radiaani

$$\delta = \frac{s}{r_{seg}}, \quad (29)$$

missä  $S$  on kaaren pituus ja  $r_{\text{seg}}$  segmentin säteen pituus. On huomioitava, että yhtälö (29) pitää paikkansa vain pienillä kulman arvoilla, kun  $\lim_{\delta \rightarrow 0} \sin(\delta) = \delta$ . Tässä työssä urien lukumäärä on pääasiassa 18 kpl, ja urien leveys  $2 - 3$  mm, jolloin segmenttikulmat ovat pieniä ja yhtälö (29) soveltuu täten käytettäväksi.



**Kuva 18.** FEMM-ohjelmalla piirretty roottorimalli, jossa on 10 mm leveitä uria 6 kappaletta ja urat ovat säteen suuntaisia. Merkittynä origo  $O$ , koordinaatiston  $x$ - ja  $y$ -akselit, uran kulmapisteet 1 ja 2, uritetun roottorin säde  $R$ , sisäkehän säde  $r_s$ , uran syvyys  $U_d$ , uran leveys  $U_w$ , pisteen 1 segmenttikulma  $\delta_1$  ja eräs uravälinsegmentti, jonka segmenttikulma on  $\delta_3$  ja kaariosan pituus  $S$ .

Segmenttikulman  $\delta$  ja säteen  $r$  avulla voidaan määrittää pisteen  $x$ - ja  $y$ -koordinaatit seuraavasti

$$\begin{cases} x = r \cos(\delta) \\ y = r \sin(\delta) \end{cases} \quad (30)$$

Pisteen 1 koordinaattien määrittäminen segmenttikulmalla on uraleveyden puolikkaan ja roottorin säteen määrittäminen kulmalla  $\delta_1$ . Tähän kulmaan lisätään vuoroin urien välisen kaaren

määräämä segmenttikulma  $\delta_3$  ja uraleveyden määräämä segmenttikulma, jolloin saadaan kaikkien urien ulkokehän kulmapisteet määritettyä yhtälön (30) mukaisesti. Urien välisen kaaren pituus  $S$  saadaan kun tiedetään kehän säteen  $r$  lisäksi, uran leveys  $U_w$  ja urien lukumäärä  $Q2$

$$S = \frac{2\pi r - (U_w \cdot Q2)}{Q2}. \quad (31)$$

Pisteen 2 koordinaatit kuvassa 18 lasketaan määrittämällä ensin muodostuvasta suorakulmaisesta kolmiosta Pythagoraan lauseella säde  $r_s$ . Kolmion toisen kateetin pituus saadaan vähentämällä uritetun roottorin säteestä  $R$  uran syvyys  $U_d$  ja toisen kateetin pituus on puolet uran leveydestä.

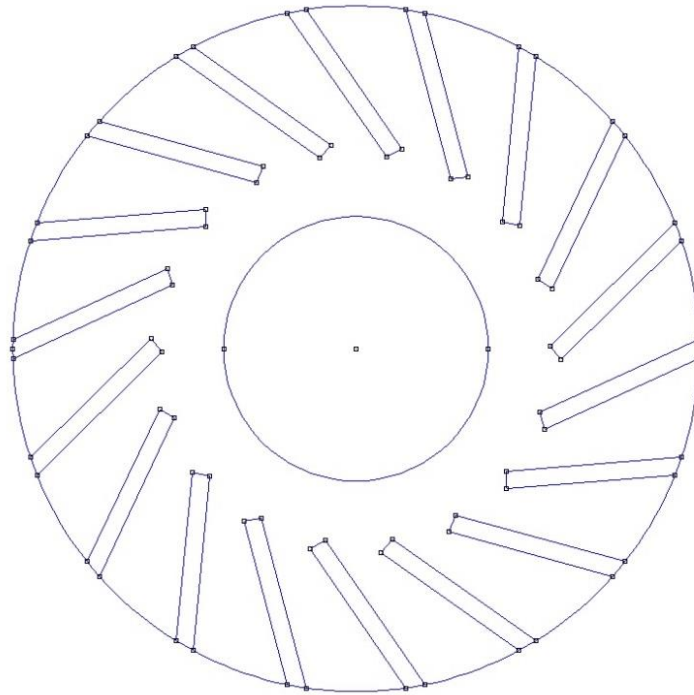
$$r_s = \sqrt{(R - U_d)^2 + \left(\frac{1}{2}U_w\right)^2}. \quad (32)$$

Tämän jälkeen tarvittava säteen rajaama kulma saadaan seuraavasti

$$\vartheta = \cos^{-1} \left( \frac{R - U_d}{r_s} \right). \quad (33)$$

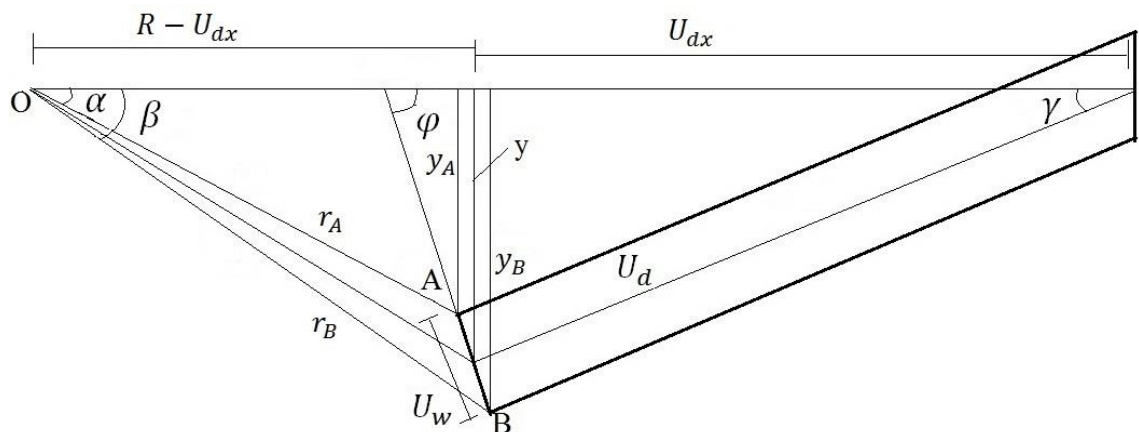
Sijoittamalla yhtälöön (30) sisäkehän säde  $r_s$  ja kulma  $\vartheta$  segmenttikulmaksi  $\delta$  saadaan pisteen 2 koordinaatit määritettyä. Sisäkehän muut pisteet määräytyvät vastaavasti kuin ulkokehän pisteet lisäämällä laskettuun kulmaan  $\vartheta$  vuoroin urien välisen kaaren määräämä segmenttikulma ja uraleveyden määräämä segmenttikulma. Nyt urien välisen kaaren pituus kaavan (31) mukaan on lyhyempi säteen ollessa pienempi. Uraleveys pysyy kuitenkin samana, jotta uramuodoksi saadaan suorakaide.

Urien ollessa säteen suhteen vinossa kulmassa muodostuu sisäkaaren pisteiden määrittäminen haastavammaksi. Kuva 19 havainnollistaa roottorimallia, kun urat on asetettu 25 asteen kulmaan säteeseen nähden. Mallissa on nyt 18 kappaletta uria, jotka ovat 2 mm leveitä. Urien pohjien tulisi olla kohtisuorassa urien sivujen kanssa, joka ei kuitenkaan aivan näin ole, kuten kuvasta nähdään. Tämän todettiin kuitenkin olevan riittävän lähellä kohtisuoruutta, jotta mallia voitiin käyttää simuloinneissa.



**Kuva 19.** FEMM-ohjelmalla piirretty roottorimalli, jossa urat ovat 25 asteen kulmassa säteeseen nähden. Urien lukumäärä on 18 kappaletta ja leveys 2 mm.

Ulkokehän pisteet asettuvat edelleen samaan tapaan kuin urien ollessa säteen suuntaiset, mutta sisäkehän pisteet asettuvat nyt eri tavalla, niiden etäisyys origosta on eri. Kuvaan 20 on piirretty lähinnä vaakatasoa oleva yksi vino ura paksulla viivalla. Kuva 20 havainnollistaa tilanteen geometrista ongelmaa, jossa pisteet A ja B ovat uran sisäkehän pisteet, ja niiden etäisyydet origosta  $r_A$  ja  $r_B$  sekä kulmat  $\alpha$  ja  $\beta$  on ratkaistava.



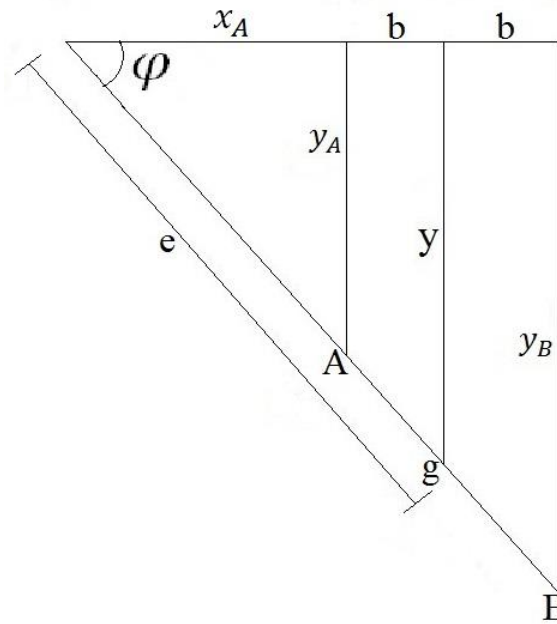
**Kuva 20.** Roottorimallin matemaattinen piirros, jossa ura on piirretty paksulla viivalla. Pisteet A ja B ovat uran sisäkehän pisteet, joiden säteet origosta O ovat  $r_A$  ja  $r_B$  sekä kulmat  $\alpha$  ja  $\beta$ . Kulma  $\gamma$  on uran kulma säteen suhteen,  $U_d$  on uran syvyys,  $U_w$  uran leveys, ja  $R$  uritetun roottorin säde.

Kuvassa 20 olevien sivujen  $U_{dx}$  ja  $y$  pituudet voidaan laskea, koska uran kulma  $\gamma$  säteeeseen nähden ja uran syvyys  $U_d$  ovat aina määritetty uramallille. Pituudet saadaan seuraavasti:

$$U_{dx} = U_d \cdot \cos \gamma \quad (34)$$

$$y = U_d \cdot \sin \gamma . \quad (35)$$

Kulma  $\varphi = 180^\circ - 90^\circ - \gamma$ . Kulma on yhteinen kolmelle kolmiolle, jotka on piirretty kuvaan 20 ja edelleen suurennettuna kuvaan 21.



**Kuva 21.** Kulman  $\varphi$  rajaamat kolme kolmiota, jossa A ja B ovat uran kulmapisteet.

Kuvan 21 kulma  $\varphi$  ja sivu  $y$  on laskettu yllä ja janojen  $Ag$  ja  $gB$  pituus on puolet uran leveydestä. Jotta pisteiden A ja B etäisyydet origosta voidaan laskea, täytyy kuvasta 21 määrittää sivujen  $y_A$  ja  $y_B$  pituudet. Ne saadaan määritettyä trigonometrisistä yhtälöistä seuraavasti

$$e = \frac{y}{\sin \varphi} , \quad (36)$$

$$y_A = \left( e - \frac{1}{2} U_w \right) \sin \varphi , \quad (37)$$

$$y_B = \left( e + \frac{1}{2} U_w \right) \sin \varphi . \quad (38)$$

Lisäksi tarvitaan samaisesta kolmiosta sivun  $b$  pituus, joka saadaan seuraavasti

$$b = (x_A + b) - x_A = \frac{y}{\tan \varphi} - \frac{y_A}{\tan \varphi} . \quad (39)$$

Kuvista 20 ja 21 havaitaan, että pisteen A x-kateetti saadaan laskettua

$$x_A = R - U_{dx} - b . \quad (40)$$

Vastaavasti pisteen B x-kateetti saadaan laskettua

$$x_B = R - U_{dx} + b . \quad (41)$$

Pisteiden A ja B säteet  $r_A$  ja  $r_B$  voidaan nyt laskea Pythagoraan lauseella kun tiedetään molempien pisteiden x- ja y-kateetit. Pisteiden kulmat  $\alpha$  ja  $\beta$  saadaan tangentin avulla käyttämällä näitä x- ja y-kateetteja. Tämän jälkeen molempien pisteiden koordinaatit saadaan kaavalla (30) sijoittamalla segmenttikulmaksi lasketut kulmat  $\alpha$  ja  $\beta$  sekä säteet  $r_A$  ja  $r_B$ . Uran sisäkehän muut pisteet asettuvat tasaisesti, kun ratkaistuihin kulmiin  $\alpha$  ja  $\beta$  lisätään aina säteen ja urien lukumäärän määrittämä segmenttikulma  $\delta_2$

$$\delta_2 = \frac{2\pi r/Q2}{r} , \quad (42)$$

missä  $r$  on joko  $r_A$  tai  $r_B$  riippuen kumman pisteen segmenttikulma lasketaan. Näin kaikki uran sisäkehän pisteet saadaan laskettua. (WolframMathWorld 2013)

### 5.1.2 Optimointi Optimizer-työkalulla

Roottorin uramuodon optimoimiseen käytettiin Adeptin Optimizer-työkalua. Sähköko-  
neen suoritusarvot (tehokerroin, hyötysuhde, käynnistysvirta, maksimimomentti jne.)  
eivät saa optimaalista arvoaan yhtä aikaa ja siten Optimizerin käyttämä monitavoiteop-  
timointi soveltuu usein käytettäväksi erinomaisesti. Siinä työkalu tuottaa yksittäisen  
optimiratkaisun sijaan joukon tasavertaisia ratkaisuja, joita kutsutaan Pareto-  
optimaalisiksi ratkaisuksiksi. Ratkaisuille on tyypillistä, että yhtä tavoitetta ei voi parantaa  
toista huonontamatta. Optimizer-työkalulla voidaan alussa valita optimoitavat rakenteet  
ja asettaa toivotut rajoitteet ja tavoitteet optimoinnille. Monitavoiteoptimoinnissa ei kui-  
tenkaan tarvitse painottaa eri suoritusarvoja ennen optimointia, vaan painotukset voi-  
daan tehdä vasta optimoinnin jälkeen. (Ryöppö 2005: 12 – 13)

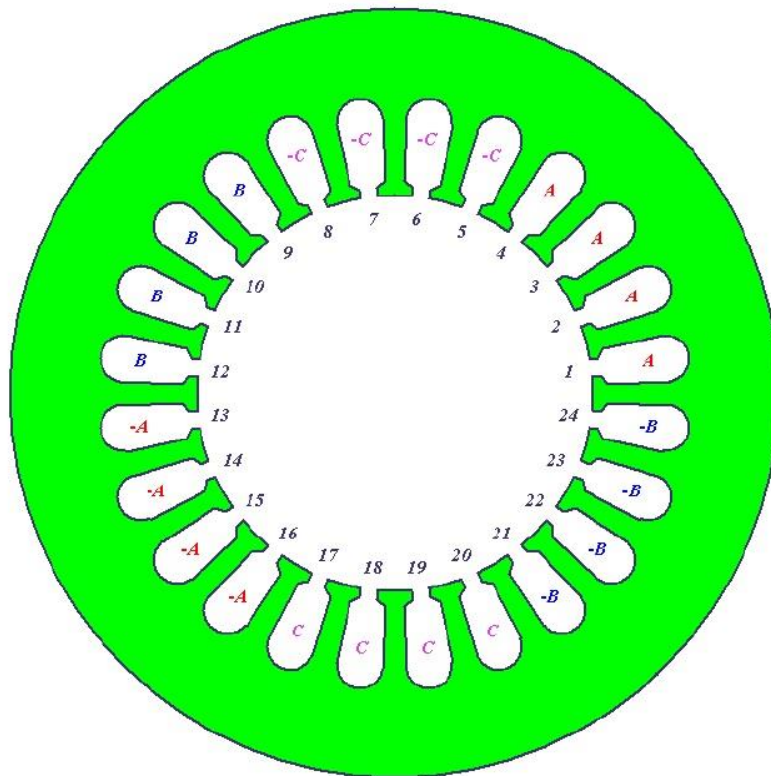
Optimizerissa on kaksi laskentatapaa, parametritarkastelu ja evoluutiotapa. Paramet-  
ritarkastelussa lasketaan kaikki mahdolliset muuttujakombinaatiot, kun taas evoluutios-  
sa käyttäjä rajoittaa populaatiokoon ja maksimimäärän generaatioille. Evoluutiotapa  
laskee ensin yksittäisiä parametreja populaatiosta ja tulosten perusteella valikoi ja  
muokkaa parametrit seuraavaa generaatiota varten. Generaatioiden rajoittamisella ei ole  
kriittistä merkitystä, koska laskentaa voidaan aina tarvittaessa jatkaa. Sen sijaan popu-

laation koko on tärkeä parametri, koska ensimmäisessä generaatiossa luodaan parametrit täysin satunnaisesti populaatiokoon rajoittavasta parametriavaruudesta. Asetettaessa populaatio liian pieneksi, ei välttämättä saada riittävän laajasti ensimmäisiä parametreja, jotka ohjaavat seuraavien laskettavien parametrien valintaa generaatiossa. (Ryypö 2013: 12 – 13) Evoluutiotapa on erityisesti tarpeen tarkasteltaessa useiden muuttujien vaikutusta, sillä parametritarkastelussa kombinaatioiden määrä kasvaa liian suureksi.

Optimizer käyttää Adeptin laskentaohjelmia, joista FCSmek on jo esitelty. Käyttäjä ohjaa laskentaohjelmiston toimintaa parametritiedostolla, jossa annetaan muun muassa käytettävä ratkaisijatyyppe (aikaharmoninen tai aika-askel), elementtien asteluku sekä tehtävätyyppi. Tehtävä voi olla esimerkiksi nimellispisteen suoritusarvojen laskeminen tai nimellispisteen sekä osakuormien suoritusarvojen laskeminen. (Ryypö 2005: 33)

## 5.2 Adeptissa käytetyt parametrit

Tässä työssä voitiin hyödyntää EGR moottorin valmista staattorin käämintämallia, koska vain roottorimallia yritettiin parantaa. Käytettävän staattorin kääminnän ja uramuodon tiedot olivat valmiiksi saatavilla. Staattorin käämien vaihekaavio on esitetty kuvassa 24.



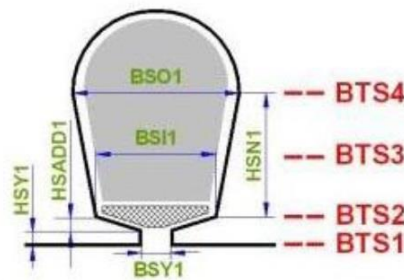
**Kuva 22.** Staattorin käämien vaihekaavio (Känsäkangas 2012: 74).

Laskentaohjelmistossa tarvittavat kääminnän parametrit on nähtävillä taulukosta 2. Arvot pysyivät muuttumattomina koko suunnitteluvaiheen ajan.

**Taulukko 2.** Käämien tärkeimmät parametrit (Känsäkangas 2012: 75).

Parametri	Arvo
Kerrosten lukumäärä	1
Rinnakkaisten haarojen lukumäärä	2
Johtimien lukumäärä urassa	9
Säikeiden lukumäärä urassa	15
Johtimen paksuus	0,67 mm

Staattorin uramuoto pysyi myös vakiona koko suunnittelun ajan. Staattorin uramuodolle käytettiin Adeptin uratyyppiä numero 5. Sen muoto ja mittojen selitykset on esitetty kuvassa 25.

**Kuva 23.** Staattorin uran mittojen selitykset (Känsäkangas 2012: 75).

Kuvassa 25 esiintyvien parametrien mitat on esitetty taulukossa 3. Mitat ovat vakiona Adeptin uratyypille numero 5.

**Taulukko 3.** Staattoriuran parametrien mitat (Känsäkangas 2012: 76).

Parametri	Pituus (mm)
HSY1	0,704
HSN1	12,252
BSY1	2,500
BSI1	6,101
BSO1	8,217

Roottorin geometrinen malli on esitelty edellä. Adeptin käyttämät parametrit ja niiden määritelmät on koottu taulukkoon 4.

**Taulukko 4.** Roottorin mallissa käytetyt parametrit ja niiden määritelmät.

Parametri	Määritelmä
Q2	Urien lukumäärä
HS2	Uran syvyys
BDTTO2	Uran leveys
HDTT2	Uran kulma säteeseen nähden

Termit ovat Adept ohjelman käyttämiä ja voivat poiketa muissa ohjelmissa käytetyistä.



## 6 LASKENNALLISET TULOKSET

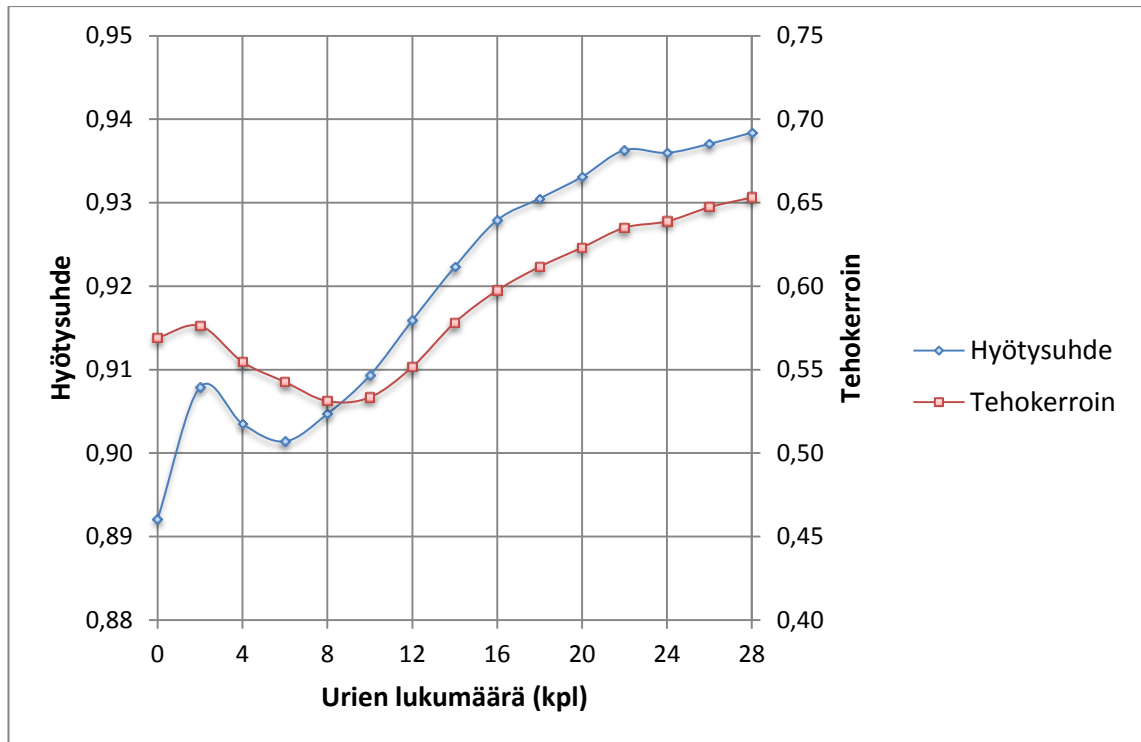
Tämän työn tarkoituksena oli löytää optimaalinen uritus massiiviroottorille, ja tässä kappaleessa esitellään kaikki Adept-ohjelmalla toteutetut laskennalliset tulokset. Luvun 6.1 – 6.3 tulokset laskettiin EGR moottorin laskentapohjaversiolla numero 2 kun taas luvun 6.4 tuloksissa käytettiin uusinta 4.2 versiota. Laskenta toteutettiin Adept Optimizerin parametritarkastelulla, missä ohjelmalle annettiin parametrit ja jokaiselle parametrille minimi- ja maksimiarvo, sekä arvojen askeleen välinen pituus. Laskennan ulostuloista tarkasteltiin hyötysuhde, tehokerroin, roottorin kuparihäviöt ja virta. Tarkasteltavia parametreja olivat roottorin urien lukumäärä, leveys, syvyys ja kulma säteeseen nähden sekä moottorin nimellisjännite ja ilmavälin pituus. Laskenta aloitettiin tarkastelemalla ensin vain osaa parametreista, jonka jälkeen tarkasteltua laskentaa laajennettiin aina edellisten laskentatulosten perusteella. Lopuksi laskenta kohdistettiin karkeiden laskentatulosten perusteella pienempiin alueisiin ja parametrien askelia tihennettiin.

Ensimmäisessä luvussa esitellään urien lukumäärän, syvyyden ja leveyden vaikutuksia hyötysuhteeseen ja tehokertoimeen. Toisessa luvussa tutkitaan miten urien viinouttaminen vaikuttaa hyötysuhteeseen ja tehokertoimeen, jonka jälkeen kolmannessa luvussa optimoidaan ilmavälin pituus ja nimellisjännite. Neljännessä luvussa verrataan vielä jännitteen muodon vaikutuksia roottorin häviöihin sileän ja uritetun roottorin tapauksessa.

### 6.1 Urien lukumäärän, syvyyden ja leveyden vaikutus

Kirjallisuusselvityksen perusteella oli tiedossa, että uritetun roottorin pitäisi parantaa merkittävästi moottorin sähköisiä arvoja sileään roottoriin verrattuna. Kirjallisuusselvityksen mukaan oli myös tiedossa, että mitä enemmän uria on ja mitä syvemmät urat ovat, sen paremmat sähköiset arvot pitäisi saavuttaa. Adeptilla tehdyt laskennalliset tulokset olivat kirjallisuusselvityksen mukaisia. Tuloksista on selkeästi nähtävissä, että sileän roottorin urittaminen parantaa merkittävästi hyötysuhdetta ja tehokerrointa.

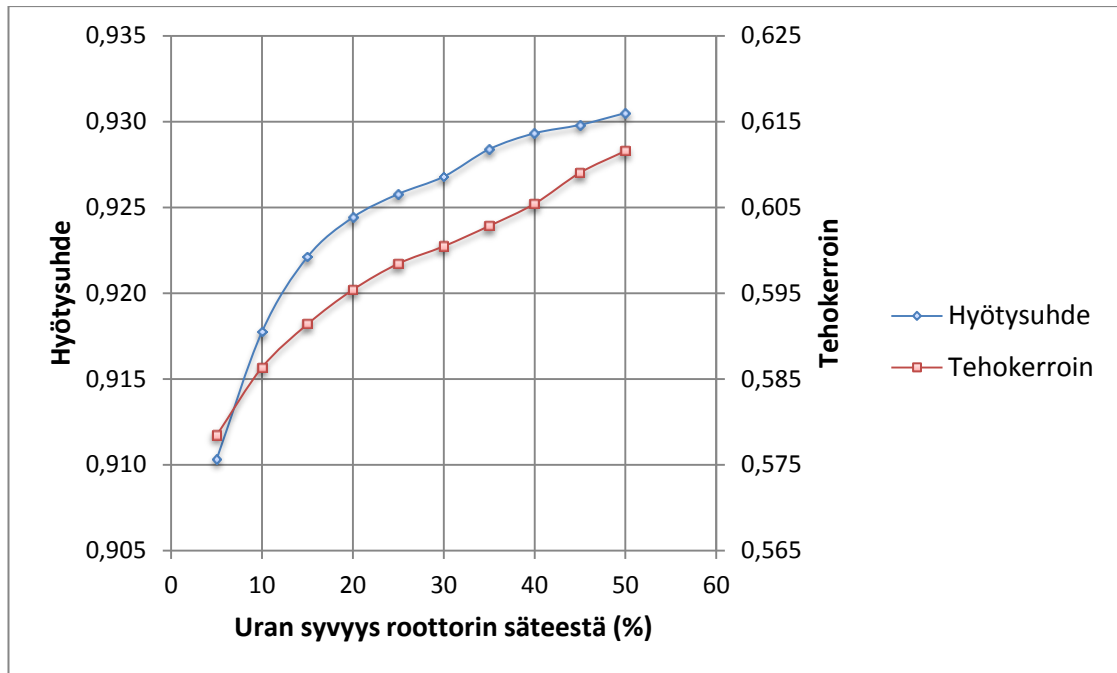
Kuvassa 24 on esitettyä sekä hyötysuhteen että tehokertoimen riippuvuus urien lukumäärästä nimellisjännitteen ollessa 400 V, ilmavälin pituuden 2 mm, uraleveyden 2 mm ja urasyvyyden 50 % roottorin säteestä. Urien lukumäärä on rajoitettu välille 0 ja 28 sekä vain parillisiin lukuihin kaavojen (5, 11 – 13) mukaisesti. Kuvasta 24 havaitaan hyötysuhteen olevan sileällä roottorilla vain 0,892, kun taas 22 uraisella se on jo 0,936. Hyötysuhde paranee 4,4 prosenttiyksikköä. Tarkasteltaessa saman tilanteen tehokerrointa se kasvaa 0,07 yksikköä välillä 0,57 – 0,64.



**Kuva 24.** Hyötysuhteen ja tehokertoimen riippuvuus urien lukumäärästä kun urien lukumäärä saa parillisia arvoja välillä 0 – 28.

Kuvan 24 käyrämuodoista voidaan todeta, että hyötysuhde ei kasva lineaarisesti urien lukumäärän kasvaessa, vaan esimerkiksi urien lukumäärillä 4, 6 ja 8 saavutetaan alempi hyötysuhde kuin urien lukumäärällä 2. Tämä saattaa aiheutua roottorin kaksinapaisuudesta, jolloin kahdella uralla saavutetaan magneetikentän kannalta napaparille suotuisa urien lukumäärä. Hyötysuhde ei myöskään kasva tasaisesti kohti ääretöntä, vaan kasvu hidastuu suurilla urien lukumäärillä. Urituksen vaikutus tehokertoimeen on alentava uraluvuilla 4 – 12 kappaletta, jonka jälkeen 14 uralla saavutetaan lähes sama tehokerroin kuin sileällä roottorilla. Vasta tätä suuremmilla uraluvuilla saavutetaan parempia tehokertoimen arvoja kuin sileällä roottorilla. Tehokertoimen lasku pienillä uraluvuilla voi selittyä jättämän muutoksilla, koska jättämälle ei asetettu vakioarvoa. Jättämän pienentyessä myös tehokerroin saa huonompia arvoja.

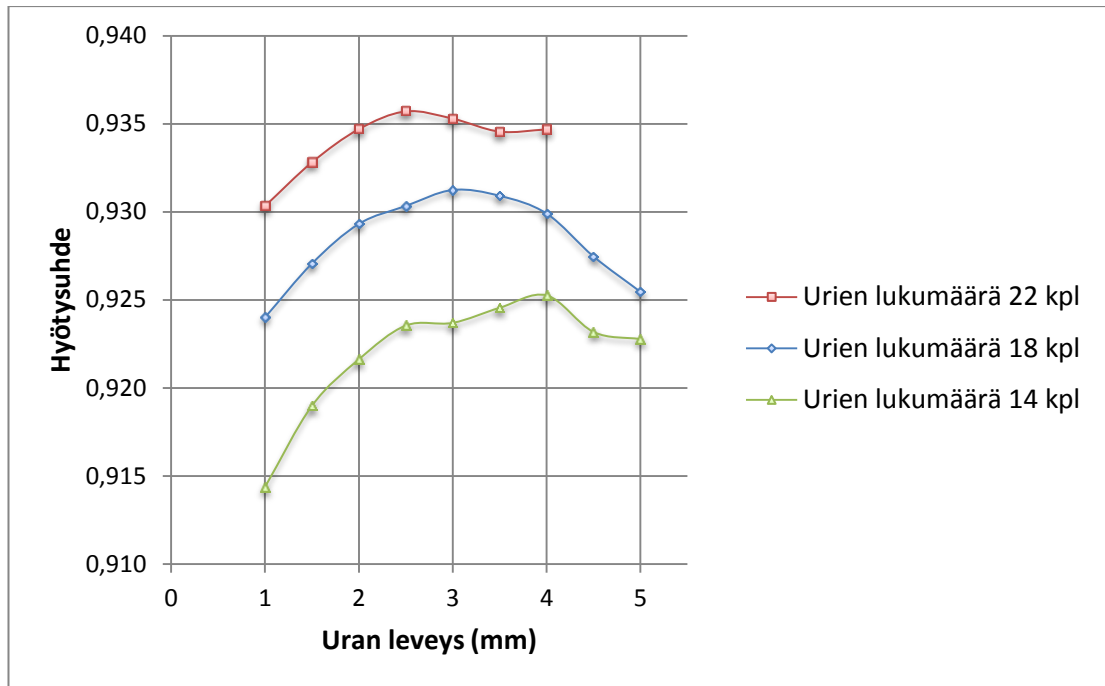
Urien lukumäärän lisäksi uran syvyyden vaikutus oli laskennallisten tulosten perusteella samansuuntainen kuin teoriaosiossa esitetty. Laskennallisten tulosten perusteella urasyvyyden kasvaessa molemmat hyötysuhde ja tehokerroin kasvavat. Hyötysuhteen sekä tehokertoimen riippuvuus urasyvyydestä on esitetty kuvassa 25 urien lukumäärän ollessa 18 kappaletta, uraleveyden 2 mm, nimellisjännitteen 400 V ja ilmvälän pituuden 2 mm.



**Kuva 25.** Hyötysuhde ja tehokerroin uran syvyyden kasvaessa.

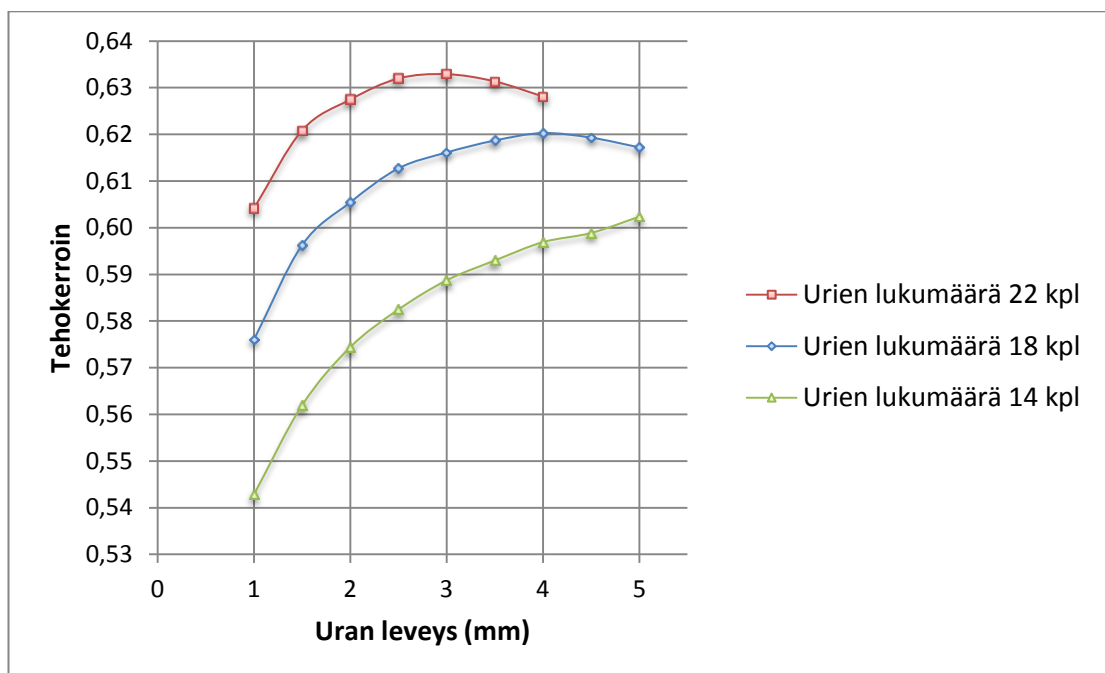
Hyötysuhde kasvaa alussa merkittävästi uran syvyyden lisääntyessä 5 %:sta 20 %:iin, mutta sen jälkeen kasvu hidastuu, kuva 25. Tehokerroin sen sijaan kasvaa melko tasaisesti uran syvyyden kasvaessa. Hyötysuhteen kokonaiskasvu on 2 prosenttiyksikköä ja tehokertoimen 0,034 yksikköä, kun uran syvyys kasvaa 5 %:sta 50 %:iin. Urien syvyyden kasvaessa täytyy kuitenkin huomioida, että roottorin mekaaninen kestävyys heikenee. Suurilla nopeuksilla roottoriin vaikuttavat suuret keskipakovoimat ja siten tässä työssä uran syvyys päädyttiin rajoittamaan 40 %:iin roottorin säteestä. Uran syvyyden lisäys 50 %:iin ei laskennallisten tulosten mukaan kuitenkaan paranna enää merkittävästi hyötysuhdetta tai tehokerrointa.

Kirjallisuusselvityksen perusteella oli tiedossa, että uran leveyden vaikutus on riippuvainen urien lukumäärästä, ja laskennalliset tulokset osoittavat hyvin tämän tuloksen. Kuvaan 26 on piirretty kolmella urien lukumäärällä eri uraleveyksien hyötysuhteen arvot, kun nimellisjännite oli 400 V, ilmavälin pituus 2 mm ja urien syvyys 40 % roottorin säteestä.



**Kuva 26.** Hyötysuhde uran leveyden suhteen eri urien lukumäärän arvoilla.

Kuvasta 26 voidaan havaita, että 22 uran tapauksessa saavutetaan paras hyötysuhde uraleveydellä 2,5 mm, 18 uran tapauksessa uraleveydellä 3 mm ja 14 uran tapauksessa uraleveydellä 4 mm. Mitä enemmän on uria, sitä pienempi uran leveys tuottaa parhaimman hyötysuhteen. Tarkasteltaessa 14 uran tapauksessa hyötysuhde kasvaa 1,1 prosenttiyksikköä uraleveyden kasvaessa 1 – 4 mm välillä. Uralukumäärän vaikutus on havaittavissa myös tehokertoimelle. Kuvaan 27 on piirretty saman tilanteen tehokertoimen arvot kolmella eri uralukumäärällä.



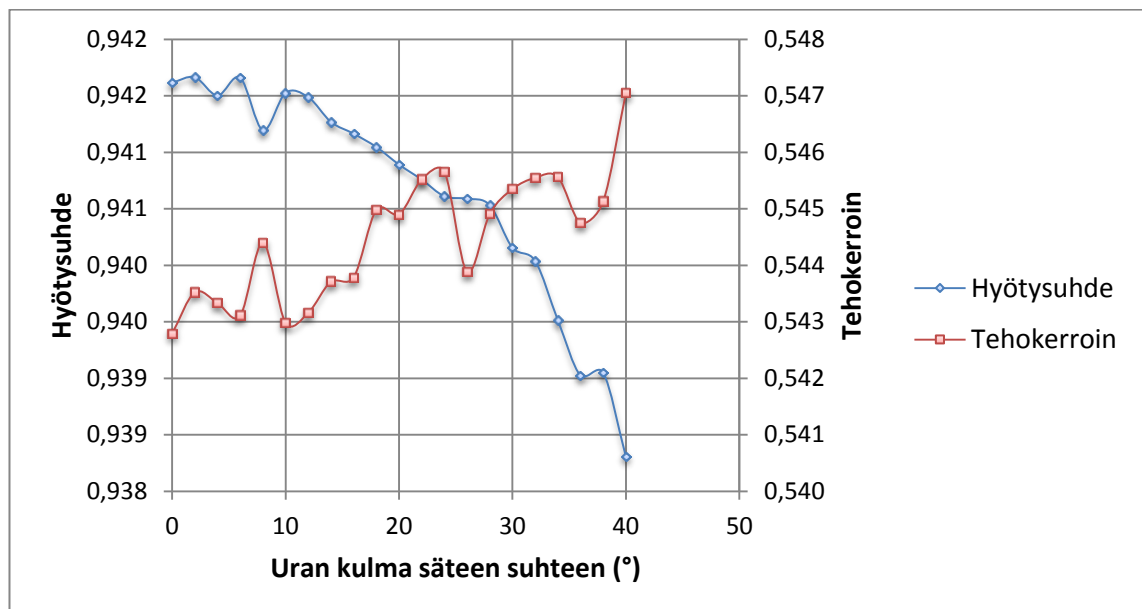
**Kuva 27.** Tehokerroin uran leveyden suhteen eri urien lukumäärän arvoilla.

Kuvasta 27 havaitaan, että 22 uran tapauksessa paras tehokertoimen arvo saavutetaan uraleveydellä 3 mm, 18 uran tapauksessa uraleveydellä 4 mm, ja 14 uran tapauksessa uraleveydellä 5 mm. Hyötysuhteen tavoin, mitä enemmän on uria, sitä pienemmällä uraleveydellä saavutetaan myös paras tehokertoimen arvo. Tehokerroin ja hyötysuhde eivät kuitenkaan saavuta maksimiarvojaan samoilla uraleveyksillä, kuten on havaittavissa kuvista 26 ja 27, eli suunnittelussa joudutaan tekemään kompromissi näiden arvojen välillä. Tarkasteltaessa 14 uran tapauksessa tehokertoimen kasvua uraleveyden kasvaessa 1 – 5 mm välillä saavutetaan 0,06 yksikön kasvu.

Tulosten perusteella voidaan yhteenvetona todeta urien lukumäärän kasvattavan eniten hyötysuhdetta ja tehokerrointa. Urien lukumäärää valittaessa on huomioitava syntyvät mekaaniset värähtelyt vääntömomentissa ja roottorissa, jotka voidaan ehkäistä sovitamalla urien lukumäärä teoriassa esitettyjen kaavojen (5 – 13) mukaiseksi. Maksimoi- malla urien syvyys mekaanisen kestävyuden rajoissa ja valitsemalla oikea uran leveys valitulle urien lukumäärälle optimoidaan lopputulos hyötysuhdetta ja tehokerrointa ajatellen.

## 6.2 Urien vinouden vaikutus

Edellisessä kappaleessa esitetyissä tuloksissa urat olivat roottorin säteen suunnassa, mutta tässä työssä tutkittiin myös urien vinouttamisen vaikutusta. Kuva 28 esittää urakulman kasvun vaikutusta säteen suunnasta sekä hyötysuhteen että tehokertoimen arvoon. Tilanteessa urien lukumäärä on 18 kappaletta, nimellisjännite 380 V, ilmavälin pituus 3 mm, uraleveys 3 mm ja urasyvyys 40 % roottorin säteestä.



**Kuva 28.** Hyötysuhde ja tehokerroin uran kulman funktiona suhteessa säteeseen.

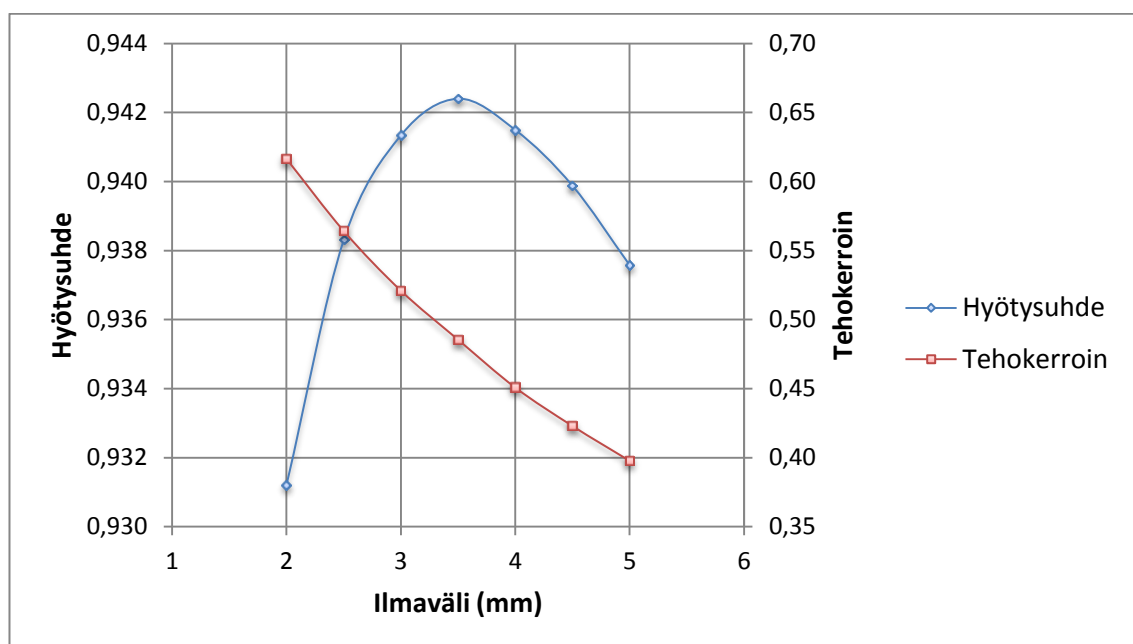
Kuvasta 28 havaitaan, että urakulman vaikutus ei ole tasainen hyötysuhteeseen ja parannusta sillä ei saavuteta. Urakulman kasvu näyttäisi vain huonontavan hyötysuhdetta,

tosin  $2^\circ$  ja  $6^\circ$  asteen urakulmalla saavutetaan pieni parannus hyötysuhteeseen. Tarkasteltaessa samassa kuvassa uran vinoutuksen vaikutusta tehokertoimeen saadaan erittäin epätasainen käyrä. Urakulman kasvu näyttäisi parantavan tehokerrointa, vaikka vaikutus on erittäin epätasainen. Tehokertoimen kasvu on kuitenkin huomattavan pientä, sillä  $24^\circ$  asteisen urakulman vaikutus tehokertoimeen aiheuttaa vain 0,003 yksikön parannuksen verrattuna  $0^\circ$  asteiseen urakulmaan.

Näiden tulosten paikkansa pitävyys herättää hieman epäilyksiä, koska tulokset ovat hyvin epätasaisia verrattuna muihin tuloksiin. Pisteiden erot hyötysuhteessa ja tehokertoimessa ovat keskenään todella pieniä, jolloin käyrien epätasaisuus voi johtua pelkästä matemaattisesta epätarkkuudesta. On myös mahdollista että, tehdyssä roottorimallissa on virheitä vinoilla kulmilla tai, että ohjelmisto ei vain laske tuloksia oikein. Tämä olisi syytä todentaa käytännössä vertaamalla testituloksia Adeptin antamiin tuloksiin, jotta päästäisiin selvyyteen virheen sijainnista.

### 6.3 Ilmavälin pituuden ja nimellisjännitteen vaikutus

Tarkastellaan suorien urien tapauksessa ilmavälin pituuden ja nimellisjännitteen vaikutusta hyötysuhteeseen ja tehokertoimeen. Kirjallisuusselvityksen mukaan oli tiedossa, että ilmavälin pituuden kasvatus parantaa hyötysuhdetta, mutta heikentää tehokerrointa. Laskennalliset tulokset olivat samansuuntaisia. Kuvaan 29 on piirretty ilmavälin vaikutus hyötysuhteeseen ja tehokertoimeen eri ilmavälin arvoilla urien lukumäärällä 18 kappaletta, urien leveydellä 3 mm, uran syvyydellä 40 % roottorin säteestä ja nimellisjännitteellä 400 V. Ilmavälin pituus ei käytännön syistä voi olla alle 2 mm, koska se heikentäisi merkittävästi muun muassa jäähdytystä.



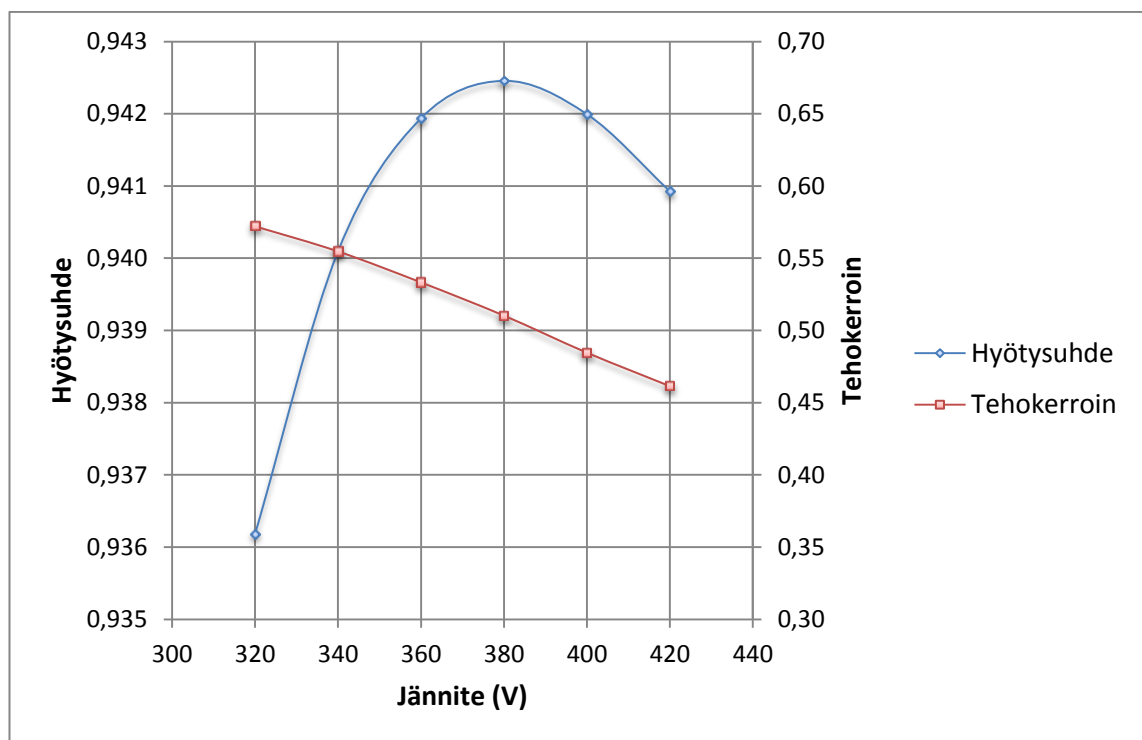
**Kuva 29.** Hyötysuhteen ja tehokertoimen riippuvuus ilmavälin pituudesta.

Kuvasta 29 havaitaan, että hyötysuhde kasvaa ilmavälin kasvaessa 2 – 3,5 mm välillä, mutta lähtee sen jälkeen laskuun, kun ilmaväli jatkaa kasvua. Paras hyötysuhteen arvo saavutetaan 3,5 mm ilmavälillä. Ilmavälin kasvun vaikutus tehokerrotimeen on sen sijaan alentava. Sen kasvu heikentää tehokerrointa melko tasaisesti. Tämä perustuu staattorivirran kasvuun, mistä mainittiin teoriaosiossa. Suunnittelussa joudutaan tässäkin tapauksessa tekemään kompromissi paremman hyötysuhteen ja paremman tehokertoimen välillä.

Nimellisjännite vaikuttaa myös hyötysuhteen ja tehokertoimen arvoihin, koska pätöteho  $P$  on verrannollinen nimellisjännitteestä  $U$  seuraavasti

$$P = \sqrt{3}UI\cos(\lambda), \quad (43)$$

missä  $I$  on nimellisvirta ja  $\cos(\lambda)$  on tehokerroin. Kuvassa 30 on esitetty hyötysuhteen ja tehokertoimen riippuvuus nimellisjännitteestä, kun urien lukumäärä on 18 kappaletta, uran leveys 3,5 mm, uran syvyys 40 % roottorin säteestä ja ilmavälin pituus 3,5 mm.



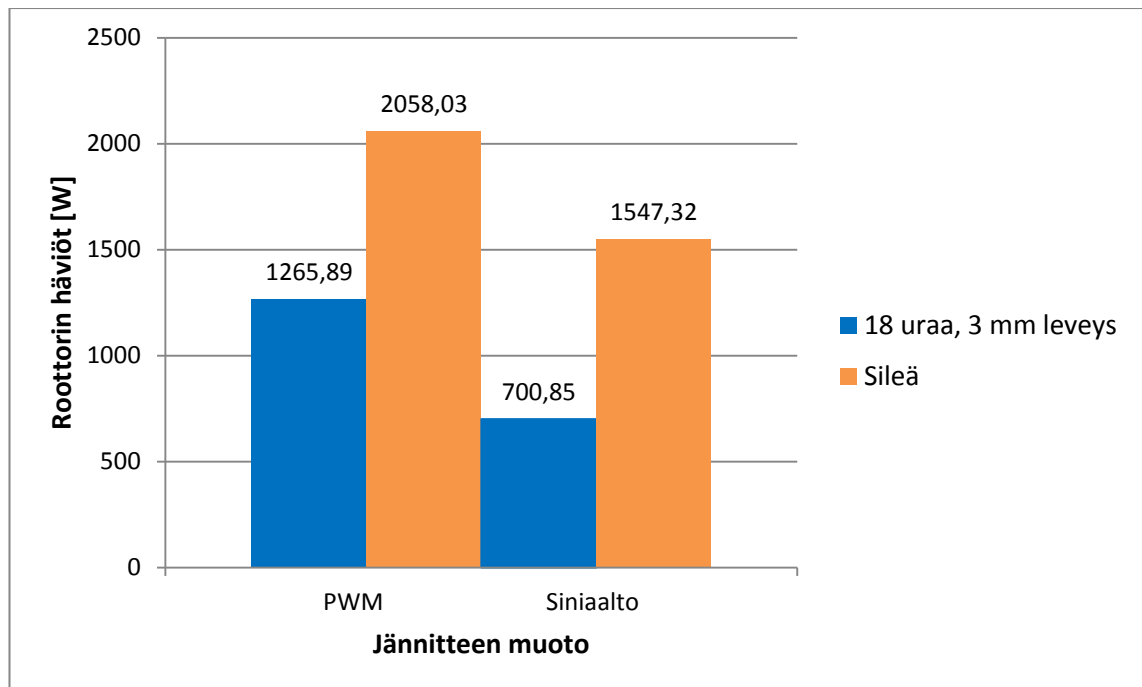
**Kuva 30.** Hyötysuhteen ja tehokertoimen riippuvuus nimellisjännitteestä.

Kuvasta 30 voidaan todeta hyötysuhteen riippuvuuden nimellisjännitteestä olevan parabolinen, ja korkein hyötysuhteen arvo saavutetaan jännitteellä 380 V. Jännitteen kasvu alentaa melko tasaisesti tehokerrointa. Tehokertoimen lasku tarkoittaa, että loistehon suhde pätötehoon verrattuna kasvaa jännitteen noustessa. Näin ollen myös nimellisjännitettä valitessa joudutaan tekemään kompromissi tehokertoimen ja hyötysuhteen väliltä.

## 6.4 Jännitteen muodon vaikutus roottorin häviöihin

Edellä esitetyt laskennalliset tulokset on saatu käyttämällä laskentaohjelmassa jännitteenmuotona siniaaltoja. Testausta varten halutaan tutkia jännitteen muodon vaikutusta roottorin häviöihin. Testit voidaan ajaa käyttämällä taajuusmuuttajan PWM jännitteen-säätöä tai kytkemällä siniaaltosuodatin taajuusmuuttajan ja moottorin väliin, jolloin jännitteen muoto on lähempänä tasaista siniaaltoja. Roottorin häviöt vaikuttavat roottorin lämpenemään sekä hyötysuhteeseen ja tehokertoimeen. Näistä varsinkin lämpenemä voi rajoittaa moottorin käyttöä.

Kuvaan 31 on havainnollistettu jännitteen muodon vaikutusta roottorin häviöihin sileällä ja uritetulla roottorilla. Uritetussa roottorissa on 3 mm levyisiä uria 18 kappaletta. Roottorin häviöt on laskettu moottoreiden nimellisessä pisteessä ilmavälin pituuden ollessa 3 mm.



**Kuva 31.** Jännitteen muodon vaikutus roottorin häviöihin.

Käyttämällä siniaaltosuodatinta taajuusmuuttajan ja moottorin välillä voidaan roottorin häviöitä alentaa merkittävästi. Tämä on seurausta pyörrevirtahäviöiden alenemisesta roottorin pinnassa, koska siniaaltosuodatin suodattaa pulssimodulaatiosta syntyviä yliaaltoja. Myös roottorin urittaminen alentaa roottorin häviöitä, koska urat ohjaavat syntyviä pyörrevirtoja suotuisiin suuntiin. Häviöt alenevat käytettäessä PWM säätöä 38 % ja käytettäessä siniaaltosuodatinta 55 %, jos sileä roottori uritetaan. Lisäämällä siniaaltosuodatin uritetun moottorin tapauksessa alentaa se roottorin häviötä 45 %.



## 7 PROTOTYYPPIEN TESTAUS

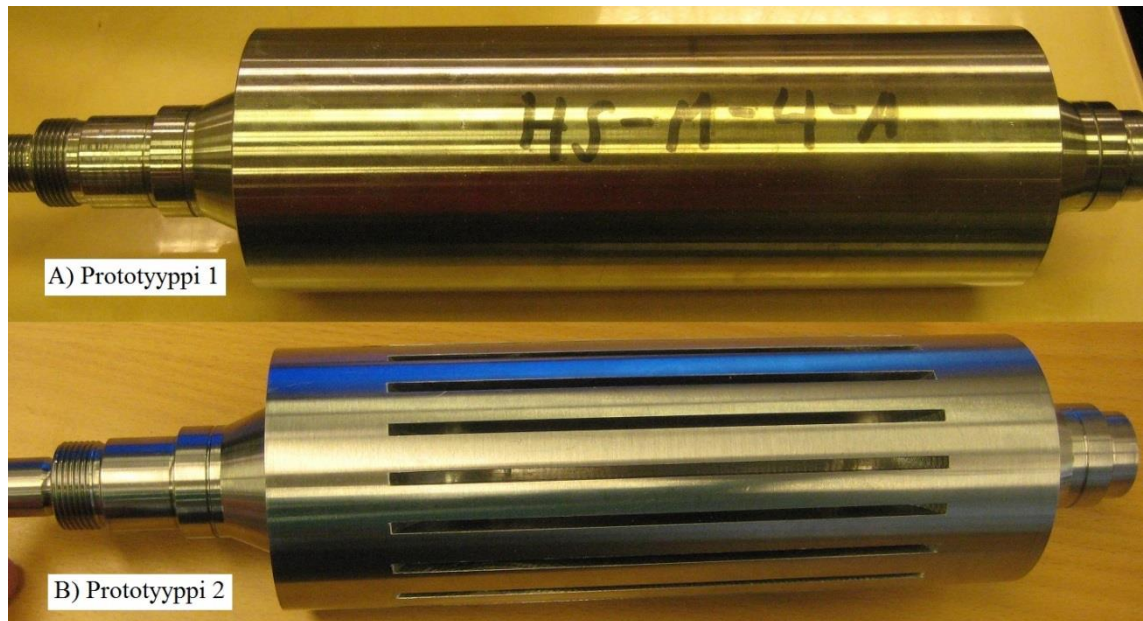
Laskennallisten tulosten perusteella päätettiin valmistaa roottorimalleista prototyyppejä, jotka testattiin ABB:n koekentällä. Testauksessa mukana toimi DI Matti Fyhr, moottorin kokoonpanossa oli opastamassa DI Jouni Turunen ja sähköisissä ongelmatilanteissa apuna toimi DI Ville Kivelä. Roottoriaihiot tilattiin alihankkijalta ja aihoiden mitat tarkastettiin ABB:n moottoritehtaalla. Tilattujen prototyyppien mittasuhteet olivat marginaalien sisällä ja sorvauksen laatu oli kaikilla prototyypeillä hyvä. Tämän jälkeen roottorit tasapainotettiin alihankintana, ennen kuin ne voitiin kasata ABB:n protopajalla. Kasattu moottori siirrettiin koekentälle, jossa itse testiajot suoritettiin.

Luvussa 7.1 esitellään prototyypit, jonka jälkeen luvussa 7.2 kerrotaan laajemmin testauksen toteutuksesta. Luku 7.3 käsittelee vielä testauksen ongelmatilanteita ennen kuin testitulokset esitellään luvussa 7.4.

### 7.1 Prototyyppien esittely

Työn aikarajoitteet ja käytännön ongelmatilanteet toivat haasteita prototyyppien testaukselle, näistä on kerrottu enemmän luvussa 3. Tähän työhön saimme mukaan vain kahden prototyypin testaustulokset, mutta muiden suunnitelmassa olleiden prototyyppien testaus jatkuu tämän työn valmistumisen jälkeen. Testattavista prototyypeistä toinen oli sileä ja toinen työn tekijän suunnittelema uritettu massiiviroottori.

Ensimmäisenä prototyyppinä testattiin sileä massiiviroottori, joka oli jo tilattu ja löytyi hyllystä. Sileä roottori haluttiin testata, jotta uritetuille malleille saatiin vertailuarvot teräksisen massiiviroottorin lähtötilanteesta. Toisena prototyyppinä testattiin uritettu massiiviroottori, jossa oli 3 mm levyisiä uria 18 kappaletta. Urien syvyys oli 40 % roottorin säteestä (14 mm) ja urat olivat aksiaalisuuntaisia. Roottorin molempiin päihin jätettiin 30 mm oikosulkurenkait. Ilmavälin pituus oli molempia prototyyppejä testatessa 3 mm. Kuvaan 32 on yhdistettynä valokuvat molemmista prototyypeistä. Prototyypit ovat yhtä pitkiä ja leveitä sekä valmistettu samasta materiaalista, teräksestä. Tarkemmat mitat on esitetty luvun 5 taulukossa 1. Uritetun roottorin tapauksessa d-pään kierteet jätettiin valmistamatta, koska niitä ei testiroottorissa tarvita.



**Kuva 32.** Massiiviroottorien prototyypit. A) sileä massiiviroottori ja B) uritettu massiiviroottori.

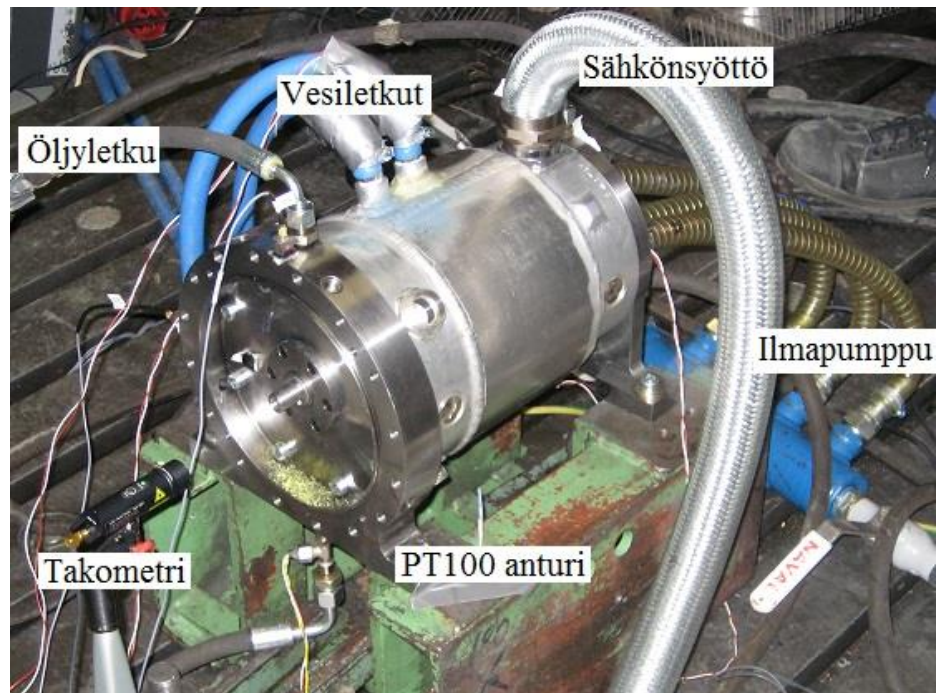
Näiden jälkeen on suunnitelmissa testata vielä uraleveyden ja urien vinouttamisen vaikutus 18 uran tapauksessa, urien lukumäärän vaikutus kasvattamalla lukumäärä 22 sekä lisäämällä radiaaliurat yhteen prototyyppiin, jolloin niiden vaikutuksista saadaan tuloksia. Ennen näiden prototyyppien testejä oli EGR moottorissa testattu kuparipäällysteinen massiiviroottori ja myös siitä saatuja tuloksia käytetään hieman tässä työssä vertailuna. Tavoitteena olisi päästä uritetulla roottorilla lähelle kuparipäällysteisen roottorin suoritusarvoja, koska toisin kuin kuparipäällysteinen roottori, soveltuu uritettu massiiviroottori paremmin massatuotantoon.

## 7.2 Testauksen toteutus

Prototyyppien testaus toteutettiin ABB:n koekentällä Vaasassa, johon oli jo valmiiksi rakennettu testipenkki aiempaa EGR moottorin testausta varten. Testikentän rajoitteiden vuoksi moottoreista voitiin ainoastaan mitata lämpenemiä, kitkahäviöt ja yhdestä tehoanalysaattorista sekä oskilloskoopista saatavia sähköisiä arvoja sekä ilmapumpun ja veden virtaukset. Lämpenemiä mitattiin molempien päiden laakereista, käämistä, tulevasta ja jäädyttävästä vedestä sekä tulevasta ja lähtevästä ilmasta. Lämpötilat mitattiin PT100 2-johtimilla, joiden tarkkuudessa on pientä virhettä, sillä häviöt eivät kompensoidu 2-johdin järjestelmässä. Ensimmäisen prototyypin testissä lämpenemät luettiin MetraHit 26S yleismittareilla, kun toisen prototyypin testauksessa käytettiin LR 8100E lämpötilapiirturia. Tehoanalysaattorina käytettiin Fluke Norma 5000 ja oskilloskoopina LeCroy Wavesurfer laitetta.

Kuvassa 33 on testattava EGR moottori kiinnitettynä korokkeeseen, joka on kiinnitetty testipenkkiin. Moottoriin on kytketty erilaisia antureita ja letkuja. Moottorin staattoria jäädytetään vedellä kuvan 33 sinisillä letkuilla, joista toisella syötetään vettä

staattoriin ja toisella imetään pois. Roottorin jäähtytys tapahtuu niin, että d-päässä on 4 ilmareikää, joista ilma virtaa moottorin sisään, kun n-päästä imetään ilmapumpulla ilma ulos. Kuvan 33 mustilla öljyletkuilla voidellaan molempien päiden laakerit pumppamalla öljyä yläpäästä moottorin päätyjen sisälle ja imemällä se alhaalta pois. Sähkön-syöttö tuodaan harmaalla kaapelilla moottorin n-päähän ja moottori maadoitetaan suoja-johdolla, joka on kiinnitettyä moottorin kylkeen.



**Kuva 33.** EGR moottori testipenkissä, johon on kiinnitettyä kaikki mittausjohdot ja letkut.

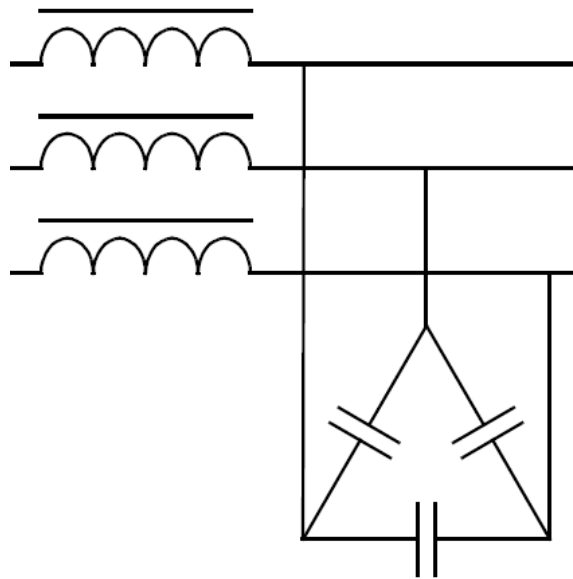
Kuvan 33 moottorissa on paljon kiinni myös erilaisia antureita, joista punavalkoisilla PT100 antureilla mitataan lämpötiloja ja harmailla kiihtyvyyssantureilla tärinöitä. Tärinöitä mitataan moottorin aksiaalisuunnassa sekä x- ja y-suunnassa moottorin n- ja d-päästä. Takometrillä mitataan roottorin pyörimisnopeutta d-päästä. Takometrin laser analysoi roottorin kehälle maalatun valkoisen pisteen avulla roottorin pyörimisnopeuden.

Kaikki testit aloitettiin ramppiajolla, jossa moottorin pyörimisnopeus nostettiin tasaisesti 300 s aikana nolasta 50 krpm nopeuteen. Samanaikaisesti antureilla mitattiin moottorissa esiintyviä tärinöitä. Tärinöiden analysointiin käytettiin Pulse-ohjelmistoa. Ramppiajon perusteella valittiin tyhjäkäyntiajoja varten sopivia pyörimisnopeuden pisteitä. Testissä varmistettiin, ettei moottoria ajeta pyörimisnopeudella, joka synnyttää suuria tärinöitä moottoriin. Tärinät voivat hajottaa erityisesti laakerit.

Tyhjäkäyntiajoissa moottoria ajettiin tietyissä pisteissä niin kauan, että moottorin lämpötilat tasoittuivat. Käytännössä lämpötilojen tasoittuminen vei pisteestä ja moottorin alkulämpötiloista riippuen puolesta tunnista tuntiin. Lämpötilojen tasoittuminen on havaittavissa käämin lämpötilasta, joka 15 minuutin aikana ei muutu enempää kuin 0,5 °C. Jokaisesta tyhjäkäyntipisteestä kirjattiin tasoittuneet lämpötilat ja analysaattorin

sähköiset arvot ylös, sekä oskilloskoopin tiedosto tallennettiin, jonka jälkeen moottori pysäytettiin ja mitattiin roottorin pinnan lämpötila. Mittausta varten oli n-pään kilpeen porattu reikä, josta voitiin työntää anturi kiinni roottorin pintaan. Testiajossa reikä suljettiin umpeen teipillä.

Laskentatulosten perusteella tiedettiin, että taajuusmuuttajan PWM säätö lisää häviöitä. Tämä todennettiin testauksessa niin, että osa testipisteistä ajettiin ilman siniaaltosuodatin ja osa se kytkettynä moottorin ja taajuusmuuttajan välille. Siniaaltosuodattimessa on kela ja kondensaattori ja sillä syötetään moottorille siniaaltoisempaa jännitettä, kuva 34.



**Kuva 34.** Siniaaltosuodattimen piirikaavio (ABB 2008: 13).

Kuorma-ajot toteutettiin kaksoistaajuusajoina, jolloin moottoria kiihdytettiin ja jarrutettiin tasaisesti nimellinopeuden molemmiin puoliin. Tämä tuotti haasteita taajuusmuuttajien ohjaamisessa, koska jättämä vaikutti pyörimisnopeuksiin ja kiihdytyksen ja jarrutuksen saaminen samanarvoiseksi ei ollut helppoa. Kuorma-ajoja ajettiin 25 – 100 % osakuormilla nimellisestä tehosta. Pulse-ohjelmistosta saatavan datan avulla voitiin laskea keskimääräinen kuormituksen mekaaninen teho kiihdytyksen ja jarrutuksen aikaisista tehovaihteluista.

Aikataulullisesti ensimmäisen prototyypin testaukseen kului noin 3 viikkoa, josta noin 1 viikko kului moottorin kasaamiseen, kiinnittämiseen testipenkkiin ja testien jälkeen irrottamiseen testipenkistä, purkamiseen sekä testipaikan siivoamiseen. Itse testiajot kestivät noin 2 viikkoa. Toisen prototyypin testaukseen kulunut kokonaisuus oli huomattavasti pitempi käytännön ongelmien myötä, joihin ei ollut mahdollista varautua etukäteen. Nämä ongelmat aiheuttivat paljon seisokkeja testauksen etenemisessä. Itse testiajoja ajettiin kuitenkin myös tällä moottorilla noin 2 viikkoa.

### 7.3 Testauksessa vastaan tulleita haasteita

Haasteita testauksen aikataulussa pysymiseen toivat tarvittavan testaushuoneen ja mittausvälineiden varaukset, tilojen käyttökiellot sekä päällekkäiset projektit vaikeuttivat työntekijöiden aikataulujen sovittamisessa. Usein mittausvälineiden varaukset voitiin ratkaista käyttämällä esimerkiksi lämpötilapiirturin sijaan paria yleismittaria, joiden mittauskohdetta vain vaihdettiin. Sen sijaan testauksessa korvaamattoman Pulse-ohjelmiston varaukset viivästyttivät erityisesti toisen prototyypin mittauksia. Toisen prototyypin kokoamisvaihe vei myös odotettua pitempään, koska muun muassa paksumpia välilevyjä oli tilattava.

Testauksen aikana haasteita tuotti roottorin pinnan lämpötilan luotettava mittaaminen. N-päähän poratusta reiästä oli käytännössä vaikea saada lämpömittarin anturi osumaan roottorin pintaan ja pysymään siinä paikallaan. Mittalaitteen vaihto laser lämpömittariin toi lisää epätarkkuutta suhteessa anturiin, joten silläkään ei voitu ratkaista ongelmaa. Mittauksessa roottorin pinta ehti myös aina hiukan jäähtyä, koska moottorin nopeus piti ensin jarruttaa nimellisestä (50 krpm) alle 1 krpm, jonka jälkeen roottorin vapaa pyöriminen voitiin pysäyttää d-päästä. Kun roottori oli pysähtynyt, aloitettiin roottorin pinnan lämpötilan mittaus N-päästä. On siis selvää, että roottorin pinnan lämpötila mittaukseen tuli virhettä vaikeasta testitavasta johtuen. Moottorin jäähdytys oli toteutettu vesijohtovedellä ja tulevan veden lämpötila muuttui eri testipisteiden välillä peräti 6 °C. Tämä vaikutti jo merkittävästi staattorin lämpötilaan. Myös testaushuoneen ilman lämpötilassa oli noin 2,5° asteen eroja mittauspisteiden välillä, joka nosti roottorin pinnan lämpötilaa. Analysoitaessa tuloksia nämä voitiin kuitenkin huomioida lämpenemiä laskettaessa. Vesijohtoveden lämpötilan lasku kuitenkin pidensi käämin lämpötilojen tasoittumisaikaa, koska veden lämpötila muuttui välillä pelkästään mittauksen aikana yli asteen.

Moottorin lämpötilat rajoittivat ilman siniaaltosuodatinta tehdyissä ensimmäisen prototyypin testiajoissa testausta niin paljon, ettei moottoria voinut kuormittaa ollenkaan. Toisella prototyypillä jättämä kasvoi nimellispöörimisnopeudessa merkittävästi. Sen myötä jouduttiin kuormitusajoissa nostamaan jännitettä, jotta päästiin haluttuihin virtoihin. Taajuusmuuttajan mahdollinen kytkentätaajuus toi myös käytännön rajoitteita prototyyppien testaukseen. Valittavana oli tyhjäkäyntiajoihin joko 8 kHz tai 16 kHz kytkentätaajuuudet, joista kuormitusajot voitiin toteuttaa vain 8 kHz:n kytkentätaajuudella. Yhden testipisteen aikana sattui myös sähkökatko, joka katkaisi virrat moottorista ja laakerien öljyvoitelun pumpusta. Ennen sähkökatkoa moottori pyöri nimelliskojeudellaan ja virtojen katkaisun myötä pyörimiskojeus laski vapaasti pysähdyksiin ilman laakereiden voitelua. Onneksi laakerit kuitenkin keativät pitkän pyörimisen ilman lisäöljyä, mutta kytkentälaatikosta hajosi kontaktori, joka jouduttiin vaihtamaan uuteen.

## 7.4 Testaustulokset

Massiivisten roottorien valmistus oli huomattavasti yksinkertaisempaa kuin kuparipäällysteisen, joka ei oikein sovellu massatuotantoon. Myös roottorin pinnan urittaminen onnistui ongelmitta ja työnjälki oli hyvä. Uritetun prototyypin mitat olivat paremmin toleranssien sisällä kuin kuparipäällysteisellä roottorilla. Kummankaan prototyypin tasapainotuksessa ei tarvinnut poistaa tai lisätä massaa, vaan roottorit olivat jo valmiiksi tasapainossa. Tämä on etuna kuparipäällysteiseen roottoriin verrattuna, jossa kuparia on vaikea saada konsentrisesti roottorin päälle. Molempien roottoreiden tapauksessa moottori kytkettiin kolmioon eli seuraavissa luvuissa esiintyvät jännitteet ovat vaiheiden välisiä jännitteitä.

Seuraavissa alaluvuissa vertaillaan eri roottoreiden vaikutuksia moottorin mekaaniseen tärinään, meluun ja kitkahäviöihin. Sen jälkeen tarkastellaan siniaaltosuodattimen ja kytkentätaajuuden vaikutuksia, jonka jälkeen verrataan roottorin pinnan ja käämin lämpenemiä eri roottoreiden välillä. Viimeisenä analysoidaan miten laskennalliset tulokset vastasivat saatuja testituloksia.

### 7.4.1 Mekaanisen tärinän ja melun vertailu

Jokaisen moottorin testaus alkoi ramppiajolla, jossa tutkittiin moottoreiden tärinöitä ja samalla kuuloaistilla havainnoitiin syntyvää melua. Ensimmäisen prototyypin ramppiajossa havainnoitiin tärinöitä pyörimisnopeuksilla noin 20 ja 35 krpm. Tärinät olivat välillä 2 – 5 mm/s. Nimellispyörimisnopeudella moottorin tärinät kuitenkin laskivat ja olivat enää luokkaa  $\mu\text{m/s}$ . Kuuloaistein oli myös havaittavissa melun hiljentyminen nimellisnopeudella.

Toisen prototyypin tapauksessa tärinöitä havaittiin pyörimisnopeuksilla noin 25 krpm ja 40 krpm. Näissä kohdissa tärinät olivat kuitenkin alle 5 mm/s. Saavutettaessa nimellispyörimisnopeus laskivat tärinät myös tällä prototyypillä luokkaan  $\mu\text{m/s}$ . Pelkällä kuuloaistilla oli kuitenkin selkeästi havaittavissa suurempi meluhaitta uritetun roottorin tapauksessa verrattuna sileään roottoriin. Tätä yritettiin vähentää paksummalla välilevyllä, mutta sen vaikutus meluun oli vähäinen.

Kuparipäällysteisen prototyypin testauksessa moottorin melu oli verrattavissa sileän roottorin tapaukseen. Ilmeisesti siis uritus aiheuttaa ylimääräistä ääntä, kun ilmavirta kulkee roottorin pinnan yli. Toki myös seuraavassa luvussa esitellyt kasvavat kitkahäviöt voivat muuttua ääneksi. Tätä voitaisiin todennäköisesti vähentää suunnittelemalla urituksen pintaan ohut pinnoitus, jolloin pinta saataisiin sileäksi. Vaarana on kuitenkin menettää urituksen jäähdytystä parantava ja pyörrevirtahäviöitä alentava vaikutus.

### 7.4.2 Kitkahäviöiden vertailu

Kitkahäviöiden laskemista varten tarvitaan roottoreiden hitausmassat. Ne lasketaan roottoreiden massojen ja dimensioiden avulla. Työhön tarvittavat hitausmassat saatiin mekaniikkapuolen laskijalta DI Jouni Turuselta ja niiden arvot on esitetty taulukossa 5.

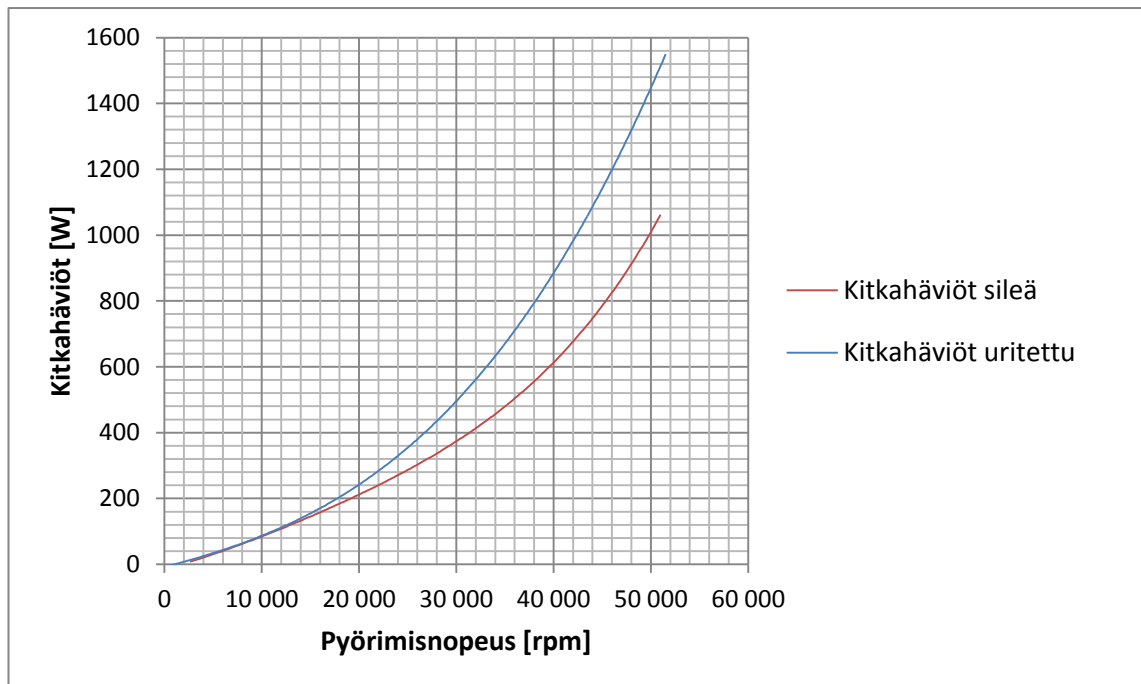
**Taulukko 5.** *Roottoreiden massat ja hitausmassat.*

Roottori	Massa [kg]	Hitausmassa $J_r$ [kgm <sup>2</sup> ]
Sileä	6,540	0,0037351
Uritettu	5,811	0,0031342
Kuparipäällystetty	6,633	0,0038419

Kitkahäviöiden mittaus toteutettiin testiajolla, jossa moottorin pyörimisnopeus nostettiin ensin hieman yli nimellisen pyörimisnopeuden, 50 krpm. Tämän jälkeen virransyöttö moottoriin katkaistiin, jolloin pyörimisnopeus laski vapaasti pysähdyksiin asti. Tänä aikana Pulse-ohjelmistolla mitattiin sadasosasekunnin välein roottorin hetkellinen pyörimisnopeus  $\omega_r$  ja aika  $t$ . Näiden tietojen perusteella voitiin laskea syntyvät kitkahäviöt yhtälöllä

$$P_{fr} = \left| \frac{1}{2} J_r \Delta \omega_r^2 \frac{1}{\Delta t} \right|, \quad (44)$$

missä  $J_r$  on laskettavan roottorin hitausmassa. Pulse-ohjelmistolla saadut pyörimisnopeuden mittauspisteet, joista laskettiin kitkahäviöt, piirrettiin kuvaajaan. Mittauspisteisiin sovitettiin käyrä, josta voidaan lukea kitkahäviöt pyörimisnopeuden suhteen. Kuvaan 35 on piirrettynä sovitetut kitkahäviöiden käyrät sileälle ja uritetulle roottorille.

**Kuva 35.** *Mitatut sileän ja uritetun roottorin kitkahäviöt pyörimisnopeuden suhteen.*

Teorian mukaan oli tiedossa, että uritetun roottorin tapauksessa kitkahäviöiden pitäisi olla suurempia kuin sileiden roottoreiden tapauksessa. Kuva 35 todistaa tämän väitteen selkeästi, sillä sen mukaan sileän roottorin kitkahäviöt ovat nimellispyörimisnopeudella 1 kW ja uritetun roottorin 1,5 kW. Tämä ero johtuu pinnan rosoisuudesta, joka



lisää kitkahäviöitä sileään roottoriin verrattuna. Väite voidaan todistaa myös sillä, että aiemmin testatulla kuparipääällysteisellä roottorilla oli kitkahäviöiksi mitattu myös noin 1 kW. Urituksen myötä kitkahäviöt kasvavat 50 % eli erittäin merkittävästi. Samaan aikaan kuitenkin uritus alentaa pyörrevirtahäviöitä ja parantaa roottorin jäähdytystä, jolloin roottorin lämpenemä alenee sileään massiiviroottoriin verrattuna.

### 7.4.3 Siniaaltosuodattimen vaikutus

Vertaillaan seuraavaksi testitulosten perusteella siniaaltosuodattimen vaikutuksia uritetun ja sileän roottorin suorituskyvylle. Siniaaltosuodatin kytkettiin osassa testipisteitä moottorin ja taajuusmuuttajan välille, jolloin se suodattaa taajuusmuuttajalta tulevan jännitteen ja virran yliaaltoja. Moottorille tulevan virran yliaaltojen harmonisista saadaan tietoa kokonaissärön THD-kertoimesta, joka on luettavissa analysaattorista. THD määritellään seuraavasti

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}, \quad (45)$$

missä  $I_n$  on yliaaltovirta,  $I_1$  perustaajuusvirta ja  $n$  järjestysluku. Jännitteen THD saadaan samalla kaavalla sijoittamalla virtojen tilalle jännitteen arvot. THD:hen lasketaan harmoninen kokonaissärö järjestyslukuun 40 asti. (ABB 2001: 28) Analysaattori ilmoittaa THD-arvon prosenttilukuna yliaaltokomponenttien suuruudesta suhteessa normaaliin sinimuotoiseen aaltoon. Taulukossa 6 on esitettynä uritetulla roottorilla mitatut THD-arvot virroille ja jännitteille ilman siniaaltosuodatinta ja siniaaltosuodattimen ollessa kytkettynä. THD-arvojen mittauspisteessä perusaallon jännite on noin 280 V ja virta noin 42,9 A.

**Taulukko 6.** Virran ja jännitteen THD-arvot uritetun roottorin tapauksessa.

	THD ilman siniaaltosuodatinta [%]	THD siniaaltosuodattimen kanssa [%]
$I_1$	22,49	14,00
$I_2$	22,75	13,67
$I_3$	22,42	14,20
$U_{12}$	80,35	11,48
$U_{23}$	80,29	11,49
$U_{31}$	80,32	12,03

Taulukosta 6 huomataan kuinka merkittävä vaikutus siniaaltosuodattimella on jännitteen yliaaltoihin. Kokonaissärö laskee kaikissa vaihejännitteissä yli 85 prosenttia. Siniaaltosuodattimella on vaikutusta myös vaihevirtoihin, sillä niiden THD-arvot laskevat yli 36 prosenttia. Sileän roottorin tapauksessa mitattiin yhden pisteen THD-arvot ennen ja jälkeen siniaaltosuodatinta. Suodattimella oli sileän roottorin tapauksessa vielä merkit-



tävämpi vaikutus jännitteiden THD lukemiin, sillä jännitteen kokonaissärö laski vaihejännitteillä yli 87 prosenttia.

Siniaaltosuodattimen vaikutus havaittiin moottorin lämpenemissä, kun roottoreita testattiin suodatin kytkettynä ja ilman suodatinta. Sileän roottorin tapauksessa roottorin pinta kuumeni liikaa jo pelkästään tyhjäkäynnissä nimellispöörinnopeudella ilman siniaaltosuodatinta. Pinnan lämpenemää saatiin laskettua nostamalla kytkentätaajuus 8 kHz:stä 16 kHz:iin, mutta lämpenemät olivat silti liian suuria, jotta roottoria olisi voitu kuormittaa ilman siniaaltosuodatinta. Uritettua roottoria oli mahdollista kuormittaa myös ilman siniaaltosuodatinta, mutta lämpenemät olivat silloin huomattavasti korkeampia kuin jos suodatin oli kytkettynä. Siniaaltosuodatin siis laski lämpenemiä huomattavasti myös uritetulla roottorilla, koska kokonaissärön pienentyminen vähensi syntyviä häviöitä.

#### 7.4.4 Lämpenemien vertailu ja kytkentätaajuuden vaikutus

Analysoitaessa moottorin lämpenemää tutkitaan erikseen roottorin ja käämin lämpenemää, koska niiden lämpenemät rajoittavat moottorin kuormitusta ja alentavat laakeiden ikää. Roottorin pinnan lämpenemä lasketaan vähentämällä mittauksen aikainen huoneilman lämpötila mitatusta roottorin pinnan loppulämpötilasta. Käämin lämpenemä laskettiin vähentämällä mitatusta käämin loppulämpötilasta veden keskilämpötila. Veden keskilämpötila saadaan laskemalla mitattujen tulevan ja lähtevän veden lämpötilojen keskiarvo. Käämin lämpenemä laskettiin näin, koska tulevan veden virtausnopeus muuttui mittauspisteiden välillä, ja sen vaikutus haluttiin huomioida, jotta vertailu mittauspisteiden välillä voitiin tehdä.

Vertaillaan seuraavaksi roottorin pinnan lämpenemiä tyhjäkäyntiajoissa sileällä ja uritetulla roottorityypillä. Taulukkoon 7 on koottu roottoreiden vertailua varten yhteensä kolmen tyhjäkäyntipisteen arvot. Jännitteen muodon ollessa PWM ja kytkentätaajuuden 16 kHz lämpenee sileä roottori 22 °C ja käämi 4 °C enemmän kuin samalla säädöllä ajettu uritettu roottori. Urituksen vaikutus roottorin lämpenemään on merkittävä, kun taas käämiin mitätön.

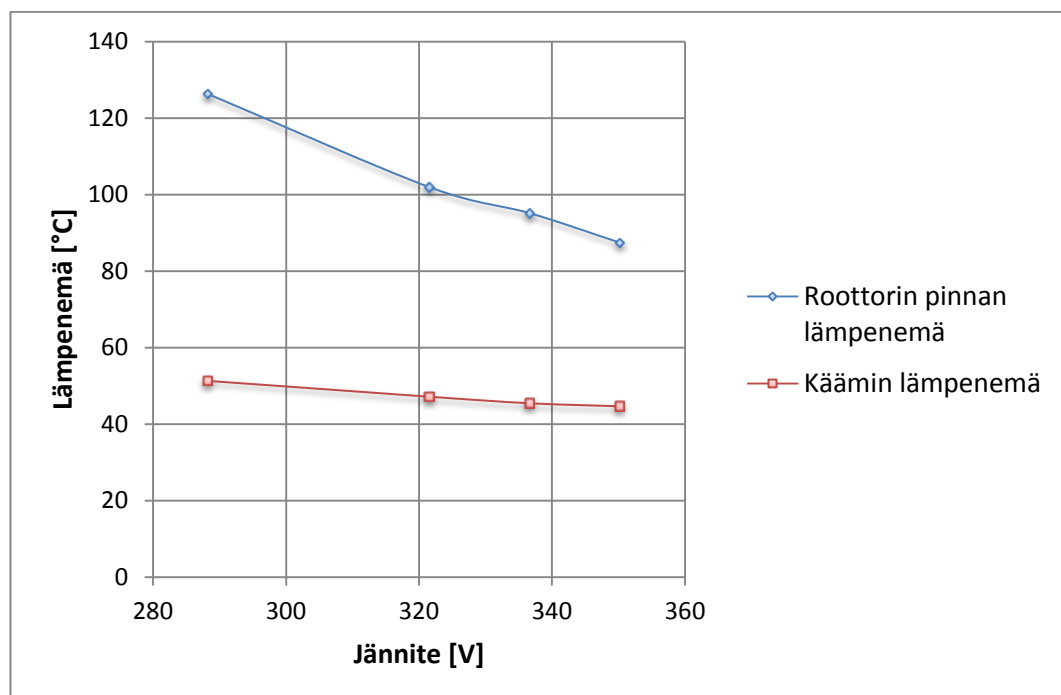
**Taulukko 7.** Tyhjäkäyntipisteiden tiedot eri roottoreilla

	Sileä roottori	Uritettu roottori	
Kytkeäntätaajuus [kHz]	16	16	8
Jännitteen säätö	PWM	PWM	Suodatin
Jännite [V]	280	281	279
Virta [A]	41	43	43
$\Delta T_{\text{roottorin pinta}} [^{\circ}\text{C}]$	101	79	35
$\Delta T_{\text{käämi}} [^{\circ}\text{C}]$	40	44	27
Veden virtaus [l/min]	2,0	1,7	1,1

Uritetulla roottorilla voidaan verrata karkeasti myös jännitteen säädön vaikutusta lämpenemiin, kun perusaallon jännite on noin 280 V ja virta 43 A. Vertailupisteissä muut-

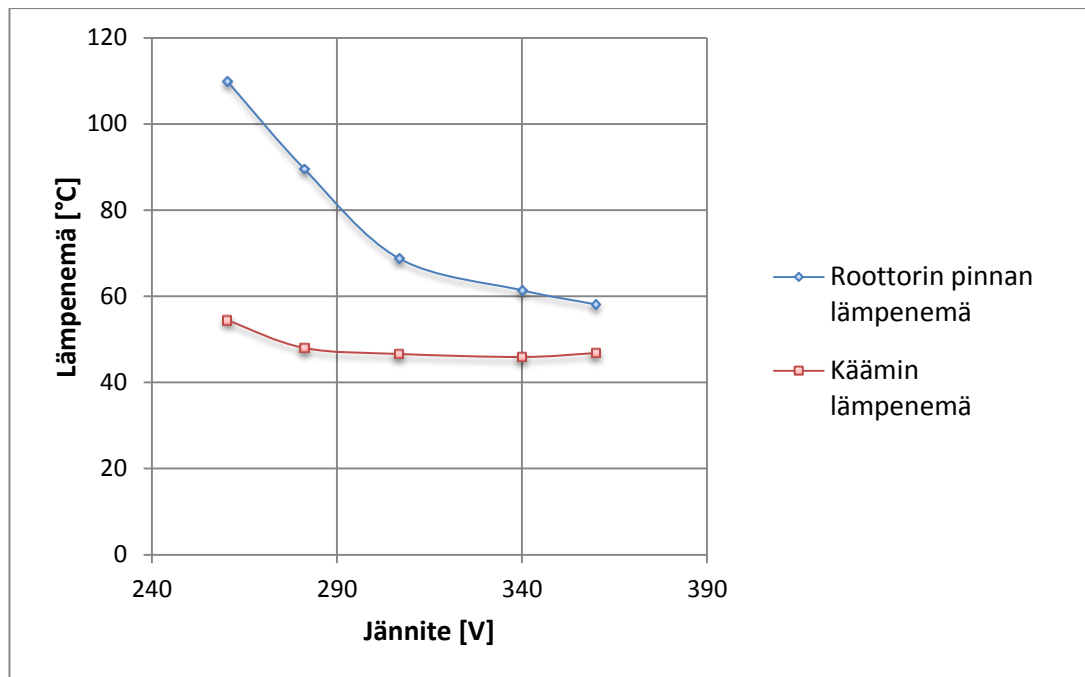
tuu myös kytkentätaajuus, joka vaikuttaa lämpenemiin. Siitä kerrotaan kuitenkin enemmän myöhemmin. Vertaamalla jännitteen säädön vaikutusta huomataan roottorin lämpenemän laskevan  $44\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja käämin  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$  käytettäessä siniaaltosuodatinta. Ero on erittäin merkittävä ja sen takia suurin osa kuormituspisteistä ajettiin siniaaltosuodatin kytkettynä. Taulukosta 7 voidaan vielä huomata veden virtauksen merkittävä muutos eri testipisteiden välillä. Uritetulla roottorilla virtausta alennettiin tarkoituksella, koska lämpenemät olivat alhaisempia kuin sileällä roottorilla. Haasteita veden virtauksen säätöön toi kuitenkin itse mittari, joka piti säätää käsin. Asetettu virtaus muuttui myös aina hieman mittauksien aikana ja mittarin tarkkuus olisi voinut olla parempi.

Analysoidaan seuraavaksi lämpenemiä kun moottoreita kuormitettiin. Testipisteissä kytkentätaajuus oli  $8\text{ kHz}$  ja siniaaltosuodatin oli kytkettynä moottorin ja taajuusmuuttajan väliin. Kuvaan 36 on havainnollistettu sileällä roottorilla jännitteen noston vaikutus roottorin pinnan ja käämin lämpenemiin keskimääräisen kuormitustehon ollessa noin  $14\text{ kW}$ . Lämpenemät siis laskevat, kun jännitettä nostetaan. Testauksessa tarkoituksena on löytää jännitteelle optimaalinen piste nostamalla sitä niin kauan kunnes käämin lämpenemä lähtee nousuun. Samaan aikaan kun käämin lämpenemä lähtee nousuun, voi useasti roottorin lämpenemä vielä jatkaa laskuaan. Valitettavasti testaus jouduttiin sileällä roottorilla lopettamaan  $350\text{ V}$ :n jännitteeseen, koska käytännön haasteiden vuoksi ei jännitettä voitu sileällä roottorilla enää nostaa tästä suuremmaksi. Käämin lämpenemän käyrästä kuitenkin huomataan, että lämpenemä ei enää juurikaan laske vaan pysyy melko tasaisena, joten optimaalinen piste jännitteelle olisi todennäköisesti noin  $350\text{ V}$ .



**Kuva 36.** Sileällä roottorilla mitatut roottorin pinnan ja käämin lämpenemä eri jännitteillä tehon ollessa noin  $14\text{ kW}$ .

Uritetun roottorin tapauksessa mitatut roottorin ja käämin lämpenemät jännitteen kasvaessa on piirrettyä kuvaan 37. Mittauspisteissä keskimääräinen kuormitusteho on noin 12,8 kW. Roottorin lämpenemäkäyrästä huomataan lämpenemän laskevan merkittävästi jännitteen noustessa 260 V:sta 300 V:iin. Sen jälkeen lämpenemä jatkaa hitaampaa laskuaan.



**Kuva 37.** Uritetulla roottorilla mitatut roottorin pinnan ja käämin lämpenemät jännitteen suhteen tehon ollessa noin 12,8 kW.

Kuvassa 37 käämin lämpenemä laskee ensimmäisen ja toisen pisteen välillä, jonka jälkeen se tasaantuu noin 46 °C asteeseen. Mittauspisteissä veden virtaus muuttui merkittävästi ja vaikutti siihen, ettei käämin lämpenemä lähtenyt nousuun, ennen kuin viimeisessä pisteessä jännitteen ollessa 360 V. Optimaalinen jännite olisi siis todennäköisesti myös uritetulla roottorilla noin 350 V.

Uritetun roottorin testauksessa havainnoitiin myös kytkentätaajuuden merkittävä vaikutus lämpenemiin. Kytkeäntäaajuuden kasvatus pienentää taajuusmuuttajan syöttövirran yliaaltoja, jolloin moottorin häviöt alenevat. Toisaalta taajuusmuuttajan häviöt kasvavat kytkentätaajuuden noustessa. Taulukkoon 8 on koottu roottorin ja käämin lämpenemiä kun keskimääräinen kuormitusteho oli noin 6 kW.

**Taulukko 8.** Uritetun roottorin mittauspisteiden tiedot.

Jännitteen säätö	Suodatin	PWM	PWM
KytKentätaajuus	8	16	8
Jännite [V]	277	376	391
Virta [A]	50	53	55
Laskettu keskimääräinen mekaaninen teho [kW]	5,8	5,8	6,0
$\Delta T_{\text{roottorin pinta}}$ [°C]	42	78	115
$\Delta T_{\text{käämi}}$ [°C]	30	49	59
Veden virtaus [l/min]	1,1	1,7	1,7

Taulukosta 8 havaitaan miten kytKentätaajuuden lasku 16 kHz:stä 8 kHz:iin nostaa roottorin lämpenemää 37 °C ja käämin 10 °C käyttäessä PWM-jännitteensäätöä. Näyttäisi siis siltä, että uritetua roottoria kannattaisi mieluummin ajaa 16 kHz:n kytKentätaajuudella. Valitettavasti testeissä tulivat taajuusmuuttajan virtarajat vastaan 16 kHz:n kytKentätaajuudella, kun kuormitusta kasvatettiin vielä tästä isommaksi. Vertailun vuoksi taulukossa 8 on saman tehon lämpenemä myös suodatinta käytettäessä. Roottorin pinnan lämpenemäero 8 kHz kytKentätaajuudella on 73 °C alhaisempi käytettäessä siniaaltosuodatinta. Suodatin siis alentaa merkittävästi lämpenemiä tyhjäkäyntipisteiden lisäksi myös kuormituspisteissä.

Verrattaessa roottoreita keskenään huomataan, että uritus alentaa roottorin lämpenemää. Sileää roottoria ei voitu kuormittaa nimelliskuormalla liian suurien lämpenemien takia, mutta uritetulla roottorilla tämä onnistui. On kuitenkin muistettava, että testauksessa käytetty kuormitus ei vastaa täysin todellista kuormitusta, jossa akseliin kiinnitetään oikea kuorma. ABB:n koestamon tekemien mittausten perusteella on todettu kaksoistaajuusajon aiheuttavan lisähäviöitä ja siten todellista kuormaa suuremman lämpenemän moottoriin (Lehtikangas 2008: 33). Näin ollen jos lämpenemät pysyvät sallituissa rajoissa kaksoistaajuusajon testeissä, pysyvät ne myös rajoissa tasaisella kuormituksella.

Verrataan kuvien 36 ja 37 tapauksissa viimeisen jännitepisteen lämpenemiä roottoreiden kesken. Sileän roottorin lämpenemä oli alimmillaan 87 °C ja uritetun 58 °C. Vaikka sileällä roottorilla kuormitusteho oli noin 1 kW:n enemmän kuin uritetulla, on lämpenemäero liian iso siihen nähden. Uritettu roottori siis lämpenee selkeästi vähemmän kuin sileä roottori. Käämin lämpenemä näyttäisi olevan sileällä roottorilla alhaisempi kuin uritetulla, mutta eroa on vain 2 °C. Näin pieni ero ei ole merkittävä ja voi selittyä myös sillä, että toisella roottorilla mitattiin W-vaiheen kääminpäättä ja toisella U-vaiheen.

Kokonaisuudessaan kun testejä roottoreiden välillä verrattiin, huomattiin ulostuloilman lämpötilan olevan huomattavasti suurempi uritetulla roottorilla verrattuna sileään roottoriin. Ilmeisesti siis uritus kierrättää ilmapölyä imettävää ilmaa enemmän ja saa sen siten lämpiämään enemmän. Osaltaan lämpimämpi ilma selittyy varmasti myös suuremmilla kitkahäviöillä, joista osa muuttuu lämmöksi. Sileällä roottorilla kriittisin lämpötila oli roottorin pinnalla, joka rajoitti merkittävästi moottorin kuormitusta. Uritetulla

roottorilla kriittisimmäksi lämpötilaksi muodostui n-pään laakerin lämpötila, joka kävi jo yli 95 °C ennen kuin vesijäähdytyksen virtausnopeutta nostettiin. Laakerit kestävät maksimissaan 100 °C lämpötilan.

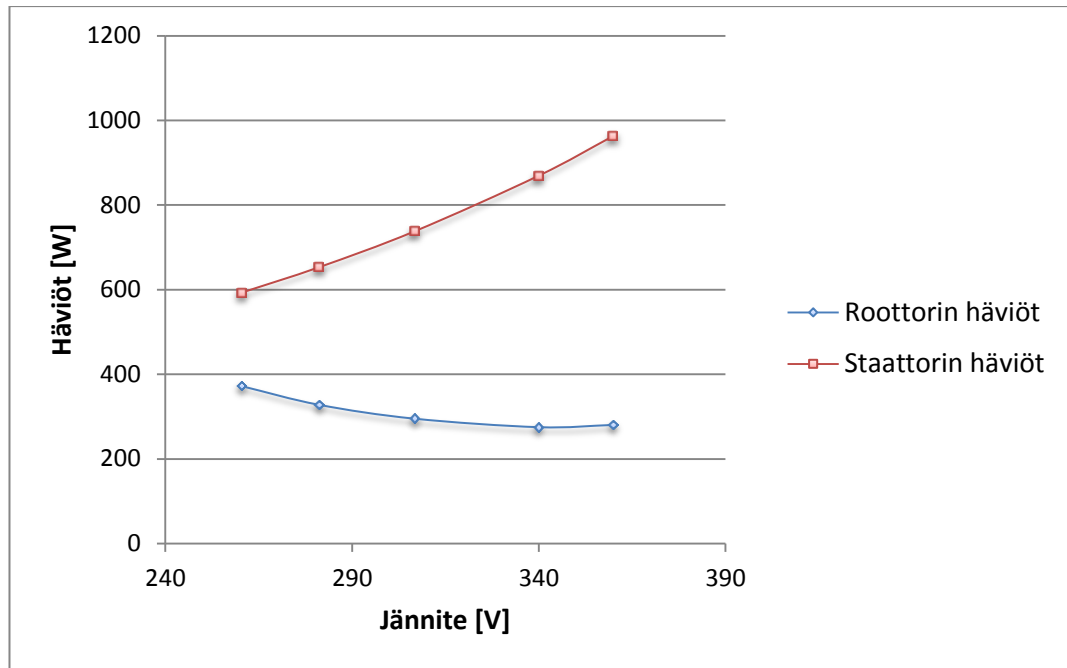
Verrataan vielä karkeasti uritetun roottorin lämpenemää kuparipäällysteiseen roottoriin. Verrataan molemmilta noin nimellistehon antava testipiste, joka ajettiin siniaaltosuodattimella ja 8 kHz:n kytkentätaajuudella. Uritetulla roottorilla lämpenemä oli 138 °C, kun se kuparipäällysteisellä oli vain 49 °C. Lämpenemäero on 65 % eli erittäin merkittävä. Tässä vertailussa on kuitenkin huomioitava, että kummallakaan roottorilla ei ajettu optimaalisinta pistettä. Vertailu havainnollistaa kuitenkin karkeasti lämpenemien eron roottoreiden välillä.

#### 7.4.5 Laskentatulosten ja testaustulosten vertailu

Laskentatulosten perusteella sileän roottorin urituksen piti parantaa moottorin suorituskykyä merkittävästi. Valitettavasti vertailu laskentatulosten ja testitulosten perusteella on hieman vaikeaa, koska testeissä ei voitu mitata hyötysuhteita ja tehokertoimia, joita Adeptin laskentatuloksista vertailtiin. Vertailua voidaan kuitenkin tehdä Adeptin laskemien virtojen ja todellisten virtojen välillä, sekä Adeptin laskemien roottorin häviöiden ja testeissä mitattujen roottorin lämpenemien välillä. Kolmantena voidaan vielä verrata luvussa 6.4 esitettyjä häviöiden muutoksia eri jännitemuodon välillä.

Verrataan ensimmäiseksi Adeptilla laskettujen virtojen yhtäpitävyyttä testiajoissa mitattuihin virtoihin. Nyt voidaan asettaa testeissä mitattu oikea kitkahäviö Adeptiin, joka muuttaa hieman aikaisempia laskuja, joissa kitkahäviöinä käytettiin sileän roottorin arvoa. Uritetun roottorin tapauksessa kuvan 37 testipisteissä, joissa kuormitus oli noin 12,8 kW antaa Adept noin 4 A pienempiä virran arvoja. Sileän roottorin tapauksessa, kuvan 36 testipisteissä, joissa kuormitus oli noin 14 kW antaa Adept noin 2,5 A suurempia virran arvoja. Erot ovat melko pieniä, varsinkin sileällä roottorilla. Virtaero voi osittain selittyä sillä, että todellisuudessa, vaikka testipisteissä käytettiin siniaaltosuodattinta, ei virran aaltomuoto ollut täydellinen sinikäyrä, vaan siinä oli edelleen yliaaltoja. Adept laskee tulokset täydellisellä siniaallolla. Kokonaisuudessaan Adeptilla lasketut virran arvot ovat melko lähellä todellisia mitattuja arvoja, joten ainakaan virta ei merkittävästi väärennä Adeptin laskemia hyötysuhteen ja tehokertoimen arvoja.

Verrataan seuraavaksi uritetun roottorin tapauksessa Adeptilla laskettuja roottorin ja staattorin häviöitä suhteessa mitattuihin lämpenemiin, jotka esiteltiin kuvassa 37. Adeptin laskemat häviöt eri jännitteillä mekaanisen tehon ollessa noin 12,8 kW on esitelty kuvassa 38. Kuvasta huomataan, että samalla kun roottorin häviöt laskevat hieman kasvavat staattorin häviöt suhteessa enemmän, kun jännite kasvaa. Kokonaishäviöt siis kasvavat jännitteen nousun myötä.



**Kuva 38.** Adeptilla lasketut roottorin ja staattorin häviöt mekaanisen tehon ollessa noin 12,8 kW.

Roottorin häviöiden lasku näkyi testituloksissa roottorin lämpenemän alentumisena, joka laski testipisteiden välillä 52 °C. Adeptilla lasketut roottorin häviötehot laskivat 92 W testipisteiden välillä. Sen sijaan, testituloksissa myös käämin lämpenemä laski hieman, mutta Adeptin laskelmien mukaan staattorin häviötehot kasvaisivat 370 W jännitteen nousun myötä. Staattorin häviöt eivät siis suoraan vaikuta käämin lämpenemään samalla tavoin kuin roottorin häviöt. Toisaalta staattorin ja sen myötä kokonaishäviöiden kasvu selittää, miksi hyötysuhteen näkökulmasta Adept antaa edelleen uritetun roottorin tapauksessa optimaalisimmaksi jännitteeksi 280 V, kun testituloksissa lämpenemisen kannalta optimaalisin jännite olisi noin 350 V.

Edellisessä alaluvussa verrattiin uritetun ja kuparipäällysteisen roottorin lämpenemiä noin nimellistehon mittauspisteissä. Lämpenemäero oli 89 °C. Jos Adeptilla lasketaan näiden pisteiden hyötysuhteet, saadaan uritetulle roottorille hyötysuhteeksi 86,54 % ja kuparipäällysteiselle roottorille hyötysuhteeksi 91,18 %. Eroa on 4,64 prosenttiyksikköä, joka on suhteessa vähemmän mitä lämpenemäero antaisi olettaa. Adeptilla lasketuissa kokonaishäviöissä on eroa noin 214 W, joka vastaa noin 16 % enemmän häviöitä uritetulla roottorilla. Tämä on suuruusluokaltaan samansuuntainen kuin hyötysuhteiden ero. Testaustulosten suuri lämpenemäero ei kuitenkaan näy Adeptilla lasketuissa hyötysuhteen arvoissa. Tämä herättää hieman epäilyksiä Adeptin laskemasta hyötysuhteesta uritetulle roottorille. Osa lämpenemäerosta selittyy todennäköisesti uritetun roottorin kasvavilla kitkahäviöillä ja urituksen ilmavirtaa lämmittävällä vaikutuksella, jolloin häviötehon vaikutus uritetun roottorin lämpenemään on suuri.

Kolmantena voidaan vielä verrata testituloksia siniaaltosuodattimen vaikutuksista Adeptin avulla laskettuihin tuloksiin. Adeptilla laskettiin roottorin häviöt luvussa 6.4 jännitteensäädöllä PWM ja siniaalto. Testitulokset olivat samansuuntaisia, kuin mitä

Adeptilla lasketut roottorin häviöt antoivat olettaa. Adeptin mukaan roottorin häviöt PWM jännitemuodolla olivat sileän roottorin tapauksessa huomattavasti suuremmat kuin uritetulla roottorilla. Tämä havaittiin käytännössä roottorin pinnan liian suurella lämpenemällä uritettuun roottoriin verrattuna. Adeptin laskentatulosten mukaan roottorin pinnan häviöt siniaaltoisella jännitteellä olivat myös huomattavasti alhaisemmat uritetulla roottorilla kuin sileällä roottorilla. Testituloksissa vertailtaessa roottorin pinnan lämpenemiä olivat sileän roottorin lämpenemät huomattavasti korkeampia kuin uritetulla roottorilla.

## 8 YHTEENVETO JA JATKOTUKIMUS

Tässä työssä optimoitiin uritus suurnopeusmoottorin sileälle massiiviroottorille, jota käytetään EGR sovelluksessa. Optimointi toteutettiin Adept-ohjelmalla käyttämällä hyödyksi Optimizer-työkalua. Adeptia varten luotiin uusi uritettu roottorimalli, joka soveltuu suorien ja vinojen aksiaalisuunnassa olevien urien laskemiseen. Laskentatulosten pohjalta valmistettiin yksi uritettu roottori, joka testattiin ABB:n koekentällä. Roottorissa oli 18 uraa, jotka olivat 3 mm leveitä ja 14 mm syviä. Uritetun roottorin lisäksi testattiin myös sileä massiiviroottori vertailupohjaksi uritetulle roottorille. Testitulosten analysoinnissa käytettiin hyödyksi myös kuparipäällysteisen roottorin testituloksia, koska uritetun massiiviroottorin tavoitteena oli päästä suoritusarvoissa mahdollisimman lähelle sen suoritusarvoja. Uritettua massiiviroottoria haluttiin tutkia, koska se soveltuisi paremmin massatuotantoon kuin kuparipäällysteinen roottori ja sen pitäisi parantaa sileän massiiviroottorin sähköisiä ominaisuuksia.

Testitulosten perusteella sileän massiiviroottorin uritus alentaa roottorin pinnan lämpenemiä merkittävästi. Käämin lämpenemiin uritus ei juuri vaikuta. Sileällä roottorilla kriittisin lämpötila oli roottorin pinnassa ja uritetulla n-pään laakerissa. Mitatut moottorin värinät eivät muuttuneet merkittävästi urituksen myötä, mutta melua syntyi huomattavasti enemmän uritetulla roottorilla. Myös kitkahäviöt kasvoivat 1 kW:sta 1,5 kW:iin urituksen myötä.

Sileän roottorin tapauksessa PWM-jännitteensäädöllä ei voitu kuormittaa roottoria ollenkaan, koska jo tyhjäkäynnissä roottorin pinta kuumeni liikaa. Sen sijaan uritettua roottoria voitiin kuormittaa PWM-jännitteensäädöllä. Toisaalta lämpenemät olivat merkittävästi korkeammat kuin käytettäessä siniaaltosuodatinta. Tulosten perusteella massiiviroottoreita kannattaa ajaa siniaaltosuodatin kytkettynä moottorin ja taajuusmuuttajan väliin. Kytkentätaajuuden nosto 8 kHz:stä 16 kHz:iin laskee lämpenemiä entisestään, joten suurempi kytkentätaajuus soveltuu paremmin massiiviroottoreiden käyttöön.

Kuormitettaessa siniaaltosuodatin kytkettynä ei sileällä roottorilla päästy nimelliseen kuormituspisteeseen, koska roottori kuumeni liikaa. Uritettua roottoria oli sen sijaan mahdollista kuormittaa nimelliskuormalla. Verrattaessa kuparipäällysteiseen roottoriin olivat lämpenemät kuitenkin merkittävästi suurempia uritetulla roottorilla. Kuparipäällysteistä roottoria voitiin helposti kuormittaa jopa ylikuormilla. Kuparipäällysteinen roottori on siis vielä selkeästi täysin omassa luokassaan, ja jotta uritettua massiiviroottoria voitaisiin käyttää kuparipäällysteisen kanssa samoissa sovelluksissa, tarvitsee se vielä lisää tuotekehitystä.

Työn aikana syntyikin paljon jatkotutkimusehdotuksia massiiviroottorin suorituskyvyn parantamiseksi. Tarkoituksena oli alun perin testata enemmän roottoreita, mutta



työn aikarajoitteiden takia ehdittiin testata vain yksi uritettu roottoriversio. Työn aikaisen testitulosten kesken jäännin myötä erityisesti säteen suhteen vinojen urien tapauksessa testitulosten saaminen jätti laskentatulokset epäluotettaviksi. Sen myötä Adeptille tehdyn mallin toimivuus vinojen urien tapauksessa jäi hieman kyseenalaiseksi. Kirjallisuudessa löytyneissä testeissä radiaaliurien lisäys aksiaalisesti uritettuun roottoriin oli myös parantanut merkittävästi moottorin suorituskykyä. Niiden vaikutus pelkkään aksiaaliuritukseen verrattuna olisi ollut mielenkiintoista päästä testaamaan. Näiden kahden uratyyppin lisäksi urien lukumäärän lisäyksen vaikutus moottorin värinöihin ja lämpenemisiin olisi myös tämän työn tulosten perusteella potentiaalinen jatkotutkimuskohde.

Sileän roottorin urittaminen kasvatti merkittävästi kitkahäviöitä, koska pinnan rosaisuus lisääntyi. Yksi mahdollisuus olisi täyttää urat jollain materiaalilla tai asentaa urien päälle pinnoitus. Kirjallisuudessa täytemateriaaleiksi on ehdotettu muun muassa epoksia. Jos urat täytetään tai pinnoitus asennetaan, menetetään urien jäähdystystä parantava ja pyörrevirtoja ohjaava vaikutus, jolloin roottorin lämpenemä saattaa nousta liialti. Toisaalta hyötysuhdetta saadaan paremmaksi, kun kitkahäviöt alenevat merkittävästi. Myös tämän testaaminen voisi olla tarpeellista. Uritetun roottorin tapauksessa n-pään laakerin lämpötila tuli kriittiseksi, joten myös laakereiden jäähdystyksen parantaminen tai laakereiden lämpötilan kestokyvyn lisääminen vaikuttaisi uritetun massiiviroottorin käytettävyyteen.

Testaustuloksissa huomattiin kytkentätaajuuden noston alentavan merkittävästi roottorin ja käämin lämpenemiä, mutta testijärjestelyt toivat rajoitteita kytkentätaajuuden nostolle. Testipaikan laitteiden käytettävyys suuremmalla kytkentätaajuudella parantaisi uritetun massiiviroottorin tuloksia. Myös kirjallisuudessa esiintynyt PAM-jännitteensäädön paremmuus PWM-jännitteensäätöön verrattuna voisi olla tarpeellista testata, jos testipaikan laitteilla tämä saataisiin järjestettyä.

## LÄHTEET

- ABB. 2001. Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas. Tekninen opas numero 6. 31 s. [WWW]. [Viitattu 24.1.2014]. Saatavissa [http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/\\$file/tekninen\\_opas\\_nro\\_6.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/$file/tekninen_opas_nro_6.pdf)
- ABB. 2008. Sine Filters ACS800. User's Manual. 72 s. [Viitattu 7.3.2014].
- Aho, T. 2007. Electromagnetic design of a solid steel rotor motor for demanding operation environments. Väitöskirja. Acta Universitatis Lappeenrantaensis, No 292. Lappeenranta. 147 s.
- Aho, T., Sihvo, V., Nerg, J. & Pyrhönen, J. 2007. Rotor Materials for Medium-Speed Solid-Rotor Induction Motors. IEEE.
- Anttila, M. 1998. Electromechanical properties of radial active magnetic bearings. Väitöskirja. Acta Polytechnica Scandinavica, Electrical Engineering Series, No 92. Espoo. 96 s.
- Celes, W., Figueiredo, L. & Ierusalimschy, R. 2000. Reference Manual of the Programming Language Lua 4.0. Computer Science Department. 53 s.
- Gessese, Y. 2012. Development of a High Speed Solid Rotor Asynchronous Drive fed by a Frequency Converter System. Dissertation. Der Technischen Universität Darmstadt. Fachbereich Elektrotechnik und Unformationstechnik. 163 p.
- Gessese, Y. Binder, A. & Funieru, B. 2010. Analysis of the effect of radial rotor surface grooves on motor losses of high speed solid rotor induction motor. (Proc. of the International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion), SPEEDAM, 14 - 16. Pisa, Italy, p.1762-1767.
- Gieras, J. & Saari, J. 2010 Performance calculation for a High Speed Solid-Rotor Induction Motor. IEEE.
- Ho, S., Niu, S., Fu, W. 2010 A Novel Solid-Rotor Induction Motor With Skewed Slits in Radial and Axial Directions and Its Performance Analysis Using Finite Element Method. Transactions on applied superconductivity, VOL. 20, NO.3. IEEE.
- Hupponen, J. 2004. High-speed solid-rotor induction machine – Electromagnetic calculation and design. Väitöskirja. Acta Universitatis Lappeenrantaensis, No 197. Lappeenranta. 168 s.

Hynnen, K. 2011. Broadband excitation in the system identification of active magnetic bearing rotor systems. Väitöskirja. Acta Universitatis Lappeenrantaensis, No 446. Lappeenranta. 137 s.

Ikäheimo, J., Kolehmainen, J., Käsäkangas, T., Kivelä, V. & Moghaddam, R. 2013. Synchronous High-Speed Reluctance Machine with Novel Rotor Construction. IEEE.

Jarvis, C. M. 1969. Nikola Tesla and the induction motor. Electronics and Power 15:12, 436 – 440. FIEE

Karady, G. & Holbert, K. 2013. Electrical Energy Conversion and Transport: An Interactive Computer-Based Approach. Chapter 9, Induction Machine. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. John Wiley & Sons, Inc.

Kokkonen, J. 2007. Sähkökäytön valintaperiaatteet ja monimootorikäytöt malmin laaduntasauksessa. Diplomityö. Siilinjärvi. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 66 s.

Käsäkangas, T. 2012. Oikosulkurenkkaan pituuden vaikutus suurnopeusmoottorin suoritusarvoihin. Diplomityö. Vaasa. Vaasan Yliopisto. 105 s.

Larjola, J., Arkkio, A. & Pyrhönen, J. 2010. Suurnopeustekniikka – High speed technology in Finland. Helsinki. Yliopistopaino.

Lehtikangas, V. 2008. Kaksoistaajuuslämpenemän toteuttaminen taajuusmuuttajalla. Insinööriö. Helsinki. Helsingin Ammattikorkeakoulu. 37 s.

Lähtenmäki, J. 2002. Design and voltage supply of high-speed induction machines. Väitöskirja. Acta Polytechnica Scandinavica, Electrical Engineering Series, No 108. Espoo. 140 s.

Meeker, D. 2010. Finite Element Method Magnetics Version 4.2. User's Manual. 158 s.

Pyrhönen, J., Nerg, J., Kurrnen, P. & Lauber, U. 2010. High-Speed High-Output Solid-Rotor Induction-Motor Technology for Gas Compression. IEEE, Transactions on industrial electronics, vol 57, No 1.

Ryppö, T. 2013. Optimizer in Adept. Technical Report, ABB, Motors and Generators. 25 s.

Saari, E. 2012. Suurnopeus- turbokoneroottoreiden termodynaaminen ja mekaaninen mallinnus sekä rakenneanalyysi. Väitöskirja. Acta Universitatis Lappeenrataensis, No 488. Lappeenranta. 133 s.

Saari, J. 1998. Thermal analysis of high-speed induction machines. Väitöskirja. Acta Polytechnica Scandinavica, No 90. Helsinki. 73 s.

Tekes. 2013 Toholammin Energia: Uusi voimalaitostyyppi Suomeen. [WWW]. [Viitattu 17.9.2013]. Saatavissa:

[http://www.tekes.fi/fi/community/Asiakkaiden\\_tuloksia/403/Asiakkaiden\\_tuloksia/647?name=Uusi+voimalaitostyyppi+Suomeen](http://www.tekes.fi/fi/community/Asiakkaiden_tuloksia/403/Asiakkaiden_tuloksia/647?name=Uusi+voimalaitostyyppi+Suomeen)

United States Patent no: 5,473,211. 1995. Asynchronous Eletric Machine and Rotor and Stator for Use in Association Therewith.

WolframMathWorld. 2013. Geometry. [WWW]. [Viitattu 1.10.2013]. Saatavissa: <http://mathworld.wolfram.com/topics/Geometry.html>

## LIITE 1: Roottorimallin koodi

### --Adeptin rottorimalli 10

```
DO2                --Roottorin halkaisija
Q2                --Roottorin urien lukumäärä
HSY2              --Ei käytössä
BSO2              --Ei käytössä
BSI2              --Ei käytössä
HS2               --Urien syvyys, annetaan prosentuaalisena
                  roottorin säteestä
BDTTO2            --Urien leveys, annetaan millimetreinä
BDTTI2            --Ei käytössä
HDTT2             --Urien kulma säteeseen nähden, annetaan
                  asteina
```

### --Uran parametrit

```
Uw=BDTTO2          --Urien leveys merkitään jatkossa
Ud=HS2*10          --Urien syvyys muutetaan oikeaan yksikköön
ALFA=HDTT2*10^5    --Urien kulma säteeseen nähden muutetaan
                  oikeaan yksikköön
```

### --Akseli

```
DI2=0.03
```

### --Lisätään ulkokehän ja sisäkehän pisteet, jotka yhdistetään janalla

```
R=DO2/2            --Roottorin säde
Ud=Ud*R            --Urien syvyys millimetreinä
```

### --Parametrit, jos urat säteen suuntaisia

```
r=R-Ud             --Sisäkehän näkymättömän kaaren säde
P=2*PI*R           --Roottorin piirin pituus
p=2*PI*r           --Roottorin sisäkehän kaaren piirin pituus
S1=( (P-(Uw*Q2)) / Q2) --Urien välisen kaaren pituus ulkokehällä
S2=( (p-(Uw*Q2)) / Q2) --Urien välisen kaaren pituus sisäkehällä
i=1
su=0.5*Uw          --1. segmentin ulkokehän kaaren pituus
si=0.5*Uw          --1. segmentin sisäkehän kaaren pituus
```

### --Jos urat säteen suhteen kulmassa, tarvitaan nämä parametrit

```
k=1
su1=su
ALFARAD=ALFA*PI/180 --Annettu kulma muutetaan radiaaneiksi
y1=Ud*sin(ALFARAD)
Udx=Ud*cos(ALFARAD)
omega=(PI/2-ALFARAD)
b=y1/tan(omega)
a=y1/sin(omega)
e=a-0.5*Uw
c=e*sin(omega)
d=e*cos(omega)
vali=b-d
x1=R-Udx-vali
r1=(x1^2+c^2)^0.5
fii=-atan(c/x1)
p1=2*PI*r1
s21=p1/Q2
segkulma1=s21/r1
```

```

kulma1=fii
y2=(e+Uw)*sin(omega)
f=(e+Uw)*cos(omega)
g=f-b
x2=R-Udx+g
r2=(x2^2+y2^2)^0.5

--Korjaus suurilla kulmilla
if ALFA > 24 then          --Korjaus r2, jos kulma on yli 24 astetta
    r2=0.985*r2
end

if ALFA < -24 then
    r1=0.985*r1          --Korjaus r1, jos kulma on alle -24 astetta
end

beeta=-atan(y2/x2)
p2=2*PI*r2
S3=p2/Q2
segkulma2=S3/r2
kulma2=beeta

--Silmukka, joka lisää urien kulmapisteet ja yhdistää ne janoilla
while k<(2*Q2+1) do
    jaannos=k-floor(k/2)*2

    if jaannos==1 then          --Pariton
        mi_addnode(R*cos(su1/R),R*sin(su1/R))
        mi_addnode(r1*cos(kulma1),r1*sin(kulma1))

        mi_addsegment(R*cos(su1/R),R*sin(su1/R),r1*cos(kulma1),r1*sin(kulma1))

        if k>1 then

            mi_addsegment(r1*cos(kulma1),r1*sin(kulma1),r2*cos(kulma2),r2*sin(kulma2))

        end

        su1=su1+S1
        kulma1=kulma1+segkulma1

    else          --Parillinen
        kulma2=kulma2+segkulma2
        mi_addnode(R*cos(su1/R),R*sin(su1/R))
        mi_addnode(r2*cos(kulma2),r2*sin(kulma2))

        mi_addsegment(R*cos(su1/R),R*sin(su1/R),r2*cos(kulma2),r2*sin(kulma2))

        su1=su1+Uw
    end
    k=k+1
end

--Lisätään puuttuvat janat ja kaaret
kulma1=fii          --Lähtöpiste 1
kulma2=beeta        --Lähtöpiste 2
mi_addsegment(r1*cos(kulma1),r1*sin(kulma1),r2*cos(kulma2),r2*sin(kulma2))

```

```

--Lisätään ilma materiaaliksi uriin
kulmamateriaali=((2*PI*0.9*R)/Q2)/(0.9*R)
kulmamat=0.0001

if Ud > 0 then

    while kulmamat < 2*PI+0.001 do
        clx = 0.985*R*cos(kulmamat)
        cly = 0.985*R*sin(kulmamat)
        mi_addblocklabel(clx,cly)
        mi_selectlabel(clx,cly)
        mi_setblockprop("Air#0",0,0,"none",0,0,0)
        mi_clearselected()
        kulmamat=kulmamat+kulmamateriaali
    end
end

```